



TUGAS AKHIR - MO141326

**ANALISIS KEKUATAN KONSTRUKSI PONDASI  
*WINCH ROLLER* UNTUK *AIRGUN UMBILICALS*  
PADA KAPAL SURVEI SEISMIK GEOMARIN IV**

Dimas Maulana Rachman

NRP. 4313 100 082

**Dosen Pembimbing**

Ir. Handayanu, M.Sc., Ph.D.

Ir. Mas Murtedjo, M.Eng.

DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN  
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2017



FINAL PROJECT - MO141326

# **STRENGTH ANALYSIS OF THE CONSTRUCTION OF AIRGUN UMBILICALS WINCH ROLLER FOUNDATION ON GEOMARIN IV SEISMIC SURVEY VESSEL**

Dimas Maulana Rachman  
NRP. 4313 100 082

## **Supervisors**

Ir. Handayanu, M.Sc., Ph.D.  
Ir. Mas Murtedjo, M.Eng.

OCEAN ENGINEERING DEPARTMENT  
FACULTY OF MARINE TECHNOLOGY  
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
SURABAYA  
2017

**ANALISIS KEKUATAN KONSTRUKSI PONDASI *WINCH ROLLER*  
UNTUK *AIRGUN UMBILICALS* PADA KAPAL SURVEI SEISMIK  
GEOMARIN IV**

**TUGAS AKHIR**

Ditujukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada Program Studi S-I Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi  
Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Oleh:

**Dimas Maulana Rachman**

NRP. 4313100082

Disetujui oleh:

1. Ir. Handyanu, M.Sc., Ph.D.



(Pembimbing 1)

2. Ir. Mas Murtedjo, M.Eng.



(Pembimbing 2)

3. Ir. Imam Rochani, M.Sc.



(Penguji 1)

4. Dr. Eng. Yeyes Mulyadi, S.T., M.Sc.



(Penguji 2)

5. Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D.



(Penguji 3)

**ANALISIS KEKUATAN KONSTRUKSI PONDASI *WINCH ROLLER*  
UNTUK *AIRGUN UMBILICALS* PADA KAPAL SURVEI SEISMIK  
GEOMARIN IV**

Nama Mahasiswa : Dimas Maulana Rachman  
NRP : 4313100082  
Departemen : Departemen Teknik Kelautan  
Dosen Pembimbing : Ir. Handayanu, M.Sc., Ph.D.  
Ir. Mas Murtedjo, M.Eng.

**ABSTRAK**

Survei seismik dalam kegiatan eksplorasi minyak dan gas dilakukan untuk mengetahui kondisi geologis di daerah tertentu. Pada prinsipnya, gelombang suara ditembakkan dari permukaan air oleh sumber suara yang disebut dengan *airgun* yang tersambung dengan *deck* melalui *umbilicals*, lalu gelombang suara pantulan akan diterima oleh sensor *hydrophone* pada *streamer*. Keduanya ditarik bersamaan pada kecepatan 5 knot. Interaksi hidrodinamis antara beban-beban lingkungan dan gerakan di antara komponen menyebabkan gaya tarik pada *umbilicals* yang selanjutnya diterima oleh konstruksi pondasi *winch roller* pada *deck*. Gaya tarik ini didapatkan dengan menganalisis interaksi antara kapal survei Gomarini IV dan konfigurasi peralatan seismik (*streamer* dan *airgun*). *Response Amplitude Operators* kapal survei Geomarin IV dan dimensi-dimensi peralatan seismik dibutuhkan dalam analisis gaya tarik. Gaya tarik pada *umbilicals* terbesar yang terjadi sebesar 23.70 kN saat *head sea* (*heading* 180<sup>0</sup>) pada setiap *line*. Kemudian DNV menyaratkan konstruksi pondasi *winch roller* harus mampu menahan beban 1.1 kali gaya tarik maksimum yang terjadi. Gaya tarik maksimum ini kemudian diaplikasikan pada model *finite element* konstruksi pondasi *winch roller*. Dapat diketahui bahwa tegangan von Mises maksimum yang terjadi adalah 27.64 MPa. Nilai ini jauh dari *yield stress* baja A36, atau 27.64 MPa << 250 MPa, dengan nilai faktor keamanan sebesar 9.05. Dengan demikian konstruksi pondasi *winch roller* untuk *airgun umbilicals* adalah sangat aman dan kuat.

Kata kunci : *Airgun*, Survei Seismik, *Winch Roller*

**STRENGTH ANALYSIS OF THE CONSTRUCTION OF AIRGUN  
UMBILICALS WINCH ROLLER FOUNDATION ON GEOMARIN IV  
SEISMIC SURVEY VESSEL**

Name : Dimas Maulana Rachman  
Registry Number : 4313100082  
Department : Ocean Engineering Department  
Supervisors : Ir. Handayanu, M.Sc., Ph.D.  
Ir. Mas Murtedjo, M.Eng.

**ABSTRACT**

Marine seismic survey in the oil and gas exploration is done to understand the geological condition of a certain region. This is done by blasting a sound wave from the water surface from a source called “airguns” which is connected to the vessel deck by “umbilicals”. The reflected sound wave will be received by “hydrophone” sensors on the “streamers”. Both the airguns and the streamers are towed behind the vessel at the tow speed of 5 knots. Hydrodynamics interaction between the environment and the motion of the equipments will create a tension in the umbilicals which is transferred to the winch roller foundation. This tension can be obtained by analyzing the interaction between Geomarin IV with the seismic survey equipments (airguns and streamers). Response Amplitude Operators of Geomarin IV and the dimensions of seismic survey equipments are needed for the tension analysis. The maximum umbilical tension obtained is 23.70 kN for head sea (heading  $180^0$ ) at each line. DNV suggests that the winch roller construction must have the capability to withstand load which is 1.1 times bigger than the maximum tension. This maximum tension is applied to the finite element model of the winch roller construction. From the finite element analysis, the maximum von Mises stress is 27.64 MPa, which is significantly below the A36 yield stress, or  $27.64 \text{ MPa} \ll 250 \text{ MPa}$ . This value gives a safety factor of 9.05, thus the construction of airgun umbilicals winch roller foundation has the required strength to ensure that the seismic survey can be proceeded without structural fail.

Keyword : Airgun, Seismic Survey, Winch Roller

## KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Warahmatullah Wabarakatuh.

Puji syukur kami ucapkan kepada Allah Subhanahu Wa Ta'ala, karena atas limpahan rahmat dan karunia-Nya, penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir berjudul “Analisis Kekuatan Konstruksi Pondasi *Winch Roller* untuk *Umbilical Airguns* pada Kapal Survei Seismik Geomarin IV” selama kurang lebih lima bulan dengan sebaik-baiknya.

Selama pengerjaan Tugas Akhir ini, penulis mendapatkan banyak sekali manfaat dalam hal pemahaman dan pengetahuan yang lebih luas terkait hidrodinamika dan hubungannya dengan struktur. Selain tentang hal yang sifatnya teoritis, penulis juga mendapatkan pengetahuan tentang bagaimana menyimulasikan suatu permasalahan yang rumit mejadi permasalahan yang lebih sederhana namun tetap mewakili permasalahan yang rumit tadi. Penulis juga mendapatkan banyak kesempatan untuk belajar berbagai macam perangkat lunak yang digunakan selama pengerjaan Tugas Akhir.

Demikian laporan ini disusun, penulis sadar bahwa laporan Tugas Akhir ini tentu memiliki banyak sekali kekurangan. Oleh karena itu penulis mengharapkan kritik membangun dan saran dari semua pihak untuk memperbaiki kekurangan dalam penulisan laporan selanjutnya. Penulis berharap seluruh pengerjaan Tugas Akhir dan laporannya dapat bermanfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan, dan khususnya bagi diri saya sendiri.

Surabaya, 17 Juli 2017

Dimas Maulana Rachman

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis dapat menyelesaikan seluruh rangkaian pengerjaan Tugas Akhir dan penulisan laporan ini karena bimbingan, dukungan, serta kebaikan dari seluruh pihak yang ikut andil dalam pengerjaan dan penulisan laporan Tugas Akhir ini. Tanpa bimbingan dan dukungan pihak-pihak tersebut, penulis hampir dipastikan akan mengalami banyak sekali hambatan dalam pengerjaan dan penulisan laporan Tugas Akhir ini. Oleh karena itu penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua penulis, Drs. Syamsuddin HIS dan Dra. Nurmiati, yang selalu mendukung baik berupa doa, dukungan moral dan dukungan finansial.
2. Ir. Handayanu, M.Sc., Ph.D. dan Ir. Mas Murtedjo, M.Eng., sebagai dosen pembimbing yang selalu memberikan bimbingan yang konsisten dan ilmu pengetahuan baru selama pengerjaan Tugas Akhir ini.
3. Pimpinan dan karyawan PT. Citra Mas yang membantu penulis dalam hal pengumpulan data dan verifikasi.
4. Herman Pratikno, S.T., M.T., Ph.D., sebagai koordinator Tugas Akhir, beserta seluruh karyawan Tata Usaha Departemen Teknik Kelautan yang telah membantu dalam hal administrasi.
5. Dr. Ir. Wahyudi, M.Sc., sebagai dosen wali yang selalu memberikan dukungan dan semangat dalam mengerjakan Tugas Akhir ini.
6. Muzdalifah Mei Nurhayati, yang memberikan dukungan dan membantu dalam mengerjakan Tugas Akhir ini.
7. Teman-teman angkatan 2013 yang selalu ada menjadi tempat berdiskusi dan berbagi informasi selama pengerjaan Tugas Akhir ini.

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL .....</b>	<b>i</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN .....</b>	<b>iii</b>
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>iv</b>
<b><i>ABSTRACT</i> .....</b>	<b>v</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>vi</b>
<b>UCAPAN TERIMA KASIH .....</b>	<b>vii</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>viii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>x</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xiii</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1. Latar Belakang Masalah .....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	3
1.3. Tujuan .....	3
1.4. Manfaat .....	4
1.5. Batasan Masalah .....	4
1.6. Sistematika Penulisan .....	4
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI .....</b>	<b>7</b>
2.1. Tinjauan Pustaka .....	7
2.2. Dasar Teori.....	10
2.2.1. Kapal Survei Seismik.....	10
2.2.2. Peralatan Survei Seismik .....	12
2.2.3. Teori Gelombang Linear .....	14
2.2.4. Respon Bangunan Apung pada Gelombang Reguler.....	16
2.2.5. <i>Response Amplitude Operator</i> (RAO) .....	29
2.2.6. Spektrum Gelombang .....	31
2.2.7. Respon Bangunan Apung pada Gelombang Acak .....	36
2.2.8. Persamaan Keseimbangan Kabel yang Ditarik di Laut .....	37
2.2.9. Tegangan pada Struktur .....	42
<b>BAB III METODOLOGI .....</b>	<b>47</b>
3.1. Alur Pengerjaan .....	47



3.2. Data yang Terkumpul .....	50
3.2.1. Data Utama Kapal Survei Geomarin IV .....	50
3.2.2. <i>General Arrangements</i> dan <i>Key Plan</i> Geomarin IV .....	51
3.2.3. <i>General Arrangement</i> Konstruksi <i>Airgun Umbilicals Winch Roller</i> ...	52
3.2.4. Data Dimensi <i>Streamer</i> , <i>Airgun</i> , <i>Floaters</i> , dan <i>Umbilicals</i> -nya.....	53
3.2.5. Data Lingkungan.....	54
<b>BAB IV ANALISIS HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>55</b>
4.1. Pemodelan Numerik Kapal Survei Seismik Geomarin IV .....	55
4.2. Analisis Gerakan Kapal Survei Seismik Geomarin IV .....	57
4.2.1. Analisis Gerakan Kapal Kondisi Terapung Bebas (0 Knot) .....	59
4.2.2. Analisis Gerakan Kapal Kondisi Melaju (5 Knot).....	64
4.3. Pemodelan Konfigurasi Peralatan Survei Seismik .....	69
4.4. Analisis Gerakan Kapal Survei Seismik Geomarin IV saat Operasi .....	74
4.4.1. <i>Spectral Response Density</i> saat Operasi <i>Heading 0<sup>0</sup></i> .....	74
4.4.2. <i>Spectral Response Density</i> saat Operasi <i>Heading 180<sup>0</sup></i> .....	76
4.5. Analisis Gaya Tarik <i>Airgun Umbilical</i> dan <i>Lead In - Streamer</i> .....	78
4.6. Pemodelan Konstruksi Pondasi <i>Airgun Umbilicals Winch Roller</i> .....	81
4.7. Analisis Tegangan Lokal Pondasi <i>Airgun Umbilicals Winch Roller</i> .....	88
4.8. Pertimbangan <i>Longitudinal Bending Moment</i> pada Analisis Tegangan.....	96
<b>BAB V PENUTUP .....</b>	<b>105</b>
5.1. Kesimpulan .....	105
5.1.1. Gerakan Kapal Geomarin IV saat Operasi Survei Seismik .....	105
5.1.2. Gaya Tarik <i>Airgun Umbilical</i> saat Operasi Survei Seismik .....	105
5.1.3. Kekuatan Konstruksi Pondasi <i>Airgun Umbilicals Winch Roller</i> .....	105
5.2. Saran .....	106
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>107</b>
<b>LAMPIRAN</b>	
<b>BIODATA PENULIS</b>	

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 1.1.</b> Geomarin III .....	2
<b>Gambar 2.1.</b> Konfigurasi <i>Airgun</i> , <i>Streamer</i> , <i>Tail Buoy</i> , dan <i>Barovane</i> .....	11
<b>Gambar 2.2.</b> Survei Seismik dengan <i>Airgun</i> .....	12
<b>Gambar 2.3.</b> <i>Umbilical</i> milik <i>Airgun</i> .....	12
<b>Gambar 2.4.</b> <i>Umbilical</i> milik <i>Streamer</i> .....	12
<b>Gambar 2.5.</b> <i>Airgun Umbilicals</i> dan <i>Floaternya</i> .....	13
<b>Gambar 2.6.</b> Parameter Umum Gelombang Reguler.....	14
<b>Gambar 2.7.</b> Enam Derajat Kebebasan pada Bangunan Apung .....	17
<b>Gambar 2.8.</b> Ilustrasi Sudut Papasan ( $\mu$ ) terhadap Laju Bangunan Apung.....	30
<b>Gambar 2.9.</b> Spektrum Energi.....	32
<b>Gambar 2.10.</b> Contoh Spektrum JONSWAP .....	34
<b>Gambar 2.11.</b> Ilustrasi Kabel yang Menarik Benda .....	38
<b>Gambar 2.12.</b> <i>Free Body Diagram</i> pada Benda .....	38
<b>Gambar 2.13.</b> Elemen Kecil Kabel Sepanjang $ds$ dan sudut $\emptyset$ .....	39
<b>Gambar 2.14.</b> Tegangan Normal dan Geser pada Elemen Tiga Dimensi .....	45
<b>Gambar 3.1.</b> Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir .....	47
<b>Gambar 3.2.</b> <i>General Arrangements</i> Geomarin IV .....	51
<b>Gambar 3.3.</b> <i>Key Plan</i> Geomarin IV .....	51
<b>Gambar 3.4.</b> Pondasi <i>Airgun Umbilicals Winch Roller</i> di <i>Main Deck</i> .....	52
<b>Gambar 3.5.</b> Konfigurasi <i>Frame Main Deck</i> Tempat Konstruksi <i>Winch Roller</i> ..	53
<b>Gambar 3.6.</b> <i>Sercel Airguns</i> dan <i>Floaters</i> .....	54
<b>Gambar 4.1.</b> <i>Lines Plan</i> Pemodelan Kapal Survei Seismik Geomarin IV .....	55
<b>Gambar 4.2.</b> Konvensi Arah Datang Gelombang.....	58
<b>Gambar 4.3.</b> RAO Gerakan <i>Surge</i> Kondisi Terapung Bebas .....	59
<b>Gambar 4.4.</b> RAO Gerakan <i>Sway</i> Kondisi Terapung Bebas .....	60
<b>Gambar 4.5.</b> RAO Gerakan <i>Heave</i> Kondisi Terapung Bebas .....	61
<b>Gambar 4.6.</b> RAO Gerakan <i>Roll</i> Kondisi Terapung Bebas.....	62
<b>Gambar 4.7.</b> RAO Gerakan <i>Pitch</i> Kondisi Terapung Bebas.....	62
<b>Gambar 4.8.</b> RAO Gerakan <i>Pitch</i> Kondisi Terapung Bebas .....	63
<b>Gambar 4.9.</b> RAO saat Arah Datang $0^0$ dan Kondisi Melaju 5 Knot.....	65

<b>Gambar 4.10.</b> RAO saat Arah Datang $45^0$ dan Kondisi Melaju 5 Knot.....	66
<b>Gambar 4.11.</b> RAO saat Arah Datang $90^0$ dan Kondisi Melaju 5 Knot.....	67
<b>Gambar 4.12.</b> RAO saat Arah Datang $180^0$ dan Kondisi Melaju 5 Knot.....	68
<b>Gambar 4.13.</b> Konfigurasi Peralatan Survei Seismik yang dimodelkan .....	70
<b>Gambar 4.14.</b> <i>Dilt Float</i> 1000 .....	71
<b>Gambar 4.15.</b> <i>Tail Buoy</i> 800 .....	71
<b>Gambar 4.16.</b> <i>Barovane</i> 46.....	72
<b>Gambar 4.17.</b> Konfigurasi <i>Airguns</i> setiap <i>Array</i> .....	73
<b>Gambar 4.18.</b> <i>Spectral Response Density</i> Geomarin IV - <i>Surge Heading</i> $0^0$ .....	75
<b>Gambar 4.19.</b> <i>Spectral Response Density</i> Geomarin IV - <i>Heave Heading</i> $0^0$ .....	75
<b>Gambar 4.20.</b> <i>Spectral Response Density</i> Geomarin IV - <i>Pitch Heading</i> $0^0$ .....	76
<b>Gambar 4.21.</b> <i>Spectral Response Density</i> Geomarin IV - <i>Surge Heading</i> $180^0$ ...	77
<b>Gambar 4.22.</b> <i>Spectral Response Density</i> Geomarin IV - <i>Heave Heading</i> $180^0$ ..	77
<b>Gambar 4.23.</b> <i>Spectral Response Density</i> Geomarin IV - <i>Pitch Heading</i> $180^0$ ...	78
<b>Gambar 4.24.</b> Konfigurasi Peralatan Survei Seismik.....	79
<b>Gambar 4.25.</b> Konstruksi Pondasi <i>Airgun Umbilicals Winch Roller</i> .....	81
<b>Gambar 4.26.</b> Konstruksi Pondasi <i>Airgun Umbilicals Winch Roller</i> .....	82
<b>Gambar 4.27.</b> Detail Bagian <i>Drum</i> .....	82
<b>Gambar 4.28.</b> Detail Bagian Dudukan .....	83
<b>Gambar 4.29.</b> Detail <i>Bracket</i> .....	84
<b>Gambar 4.30.</b> Detail Bagian Kupingan .....	84
<b>Gambar 4.31.</b> Persegi Biru adalah Struktur <i>Main Deck</i> yang Dimodelkan.....	84
<b>Gambar 4.32.</b> Persegi Biru adalah Struktur <i>Main Deck</i> yang Dimodelkan.....	85
<b>Gambar 4.33.</b> <i>Frame</i> 30 <i>Main Deck</i> , Sama dengan <i>Frame</i> 24-26, 28, 32-34, 36	86
<b>Gambar 4.34.</b> <i>Frame</i> 31 <i>Main Deck</i> , Sama dengan <i>Frame</i> 23, 27, 35, dan 37 ....	86
<b>Gambar 4.35.</b> Pemodelan Konstruksi Pondasi <i>Airgun Umbilicals Winch Roller</i>	87
<b>Gambar 4.36.</b> Pemodelan Tiga Dimensi Keseluruhan pada <i>Main Deck</i> .....	87
<b>Gambar 4.37.</b> Penentuan Tumpuan untuk Analisis Tegangan Lokal .....	89
<b>Gambar 4.38.</b> Sudut Gaya Tarik <i>Airgun Umbilical</i> .....	90
<b>Gambar 4.39.</b> Beban Tangensial yang Diaplikasikan pada Model .....	90
<b>Gambar 4.40.</b> Beban Tangensial yang Diaplikasikan pada Model .....	91
<b>Gambar 4.41.</b> Lokasi <i>Probe</i> pada plat <i>Bulkhead</i> .....	92

<b>Gambar 4.42.</b> <i>Meshing Sensitivity Check</i> .....	92
<b>Gambar 4.43.</b> <i>Meshing</i> untuk Ukuran Elemen Maksimum 120 mm.....	93
<b>Gambar 4.44.</b> Lokasi Terjadinya Tegangan von Mises Maksimum (a) .....	94
<b>Gambar 4.45.</b> Lokasi Terjadinya Tegangan von Mises Maksimum (b).....	94
<b>Gambar 4.46.</b> <i>Frame 32</i> yang Menumpu <i>Bracket Pondasi</i> .....	94
<b>Gambar 4.47.</b> Konsentrasi Tegangan pada <i>Bracket</i> dan <i>Main Deck</i> .....	95
<b>Gambar 4.48.</b> Ilustrasi Kondisi <i>Hogging</i> .....	96
<b>Gambar 4.49.</b> Ilustrasi Kondisi <i>Sagging</i> .....	97
<b>Gambar 4.50.</b> Penampang <i>Frame 23</i> yang Menerus .....	98
<b>Gambar 4.51.</b> Penampang di mana Tegangan Lentur Bekerja .....	100
<b>Gambar 4.52.</b> Penentuan Tumpuan untuk Analisis Baru .....	101
<b>Gambar 4.53.</b> Tegangan von Mises Maksimum dengan <i>Bending Moment</i> (a) ..	101
<b>Gambar 4.54.</b> Tegangan von Mises Maksimum dengan <i>Bending Moment</i> (b) ..	102
<b>Gambar 4.55.</b> <i>Frame 32</i> yang Menumpu <i>Bracket Pondasi</i> .....	102

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1.</b> Parameter-parameter Tinggi Gelombang dari Spektrum Gelombang..	36
<b>Tabel 3.1.</b> Data Utama Geomarin IV .....	50
<b>Tabel 3.2.</b> Dimensi <i>Streamer</i> per <i>Section</i> .....	53
<b>Tabel 3.3.</b> Dimensi <i>Umbilical</i> per <i>Section</i> .....	53
<b>Tabel 3.4.</b> Data Lingkungan Laut Arafuru ( <i>Omnidirection</i> ).....	54
<b>Tabel 4.1.</b> Dimensi Utama Geomarin IV .....	55
<b>Tabel 4.2.</b> Validasi Model Numerik dengan Data Hidrostatik .....	56
<b>Tabel 4.3.</b> Titik Berat (CG) Kapal Geomarin IV .....	57
<b>Tabel 4.4.</b> Pendekatan Jari-jari Girasi oleh Bureau Veritas .....	57
<b>Tabel 4.5.</b> Perhitungan Jari-jari Girasi .....	58
<b>Tabel 4.6.</b> Ringkasan RAO Maksimum Kondisi Terapung Bebas.....	64
<b>Tabel 4.7.</b> Ringkasan RAO Maksimum Kondisi Melaju 5 Knot .....	69
<b>Tabel 4.8.</b> <i>Streamer Array Built-Up</i> .....	70
<b>Tabel 4.9.</b> Dimensi <i>Dilt Float</i> .....	71
<b>Tabel 4.10.</b> Dimensi <i>Tail Buoy</i> .....	71
<b>Tabel 4.11.</b> Dimensi <i>Diverter/Barovane</i> .....	72
<b>Tabel 4.12.</b> Dimensi BOLT <i>Airguns</i> .....	72
<b>Tabel 4.13.</b> Dimensi <i>Airgun Umbilical</i> .....	72
<b>Tabel 4.14.</b> Dimensi Baro <i>FlexFloat</i> .....	73
<b>Tabel 4.15.</b> <i>Amplitude</i> Gerakan Geomarin IV Operasi Survei - <i>Heading 0<sup>0</sup></i> .....	74
<b>Tabel 4.16.</b> <i>Amplitude</i> Gerakan Geomarin IV Operasi Survei - <i>Heading 180<sup>0</sup></i> ....	76
<b>Tabel 4.17.</b> Gaya Tarik Maksimum pada <i>Lead In</i> .....	79
<b>Tabel 4.18.</b> Gaya Tarik Maksimum pada <i>Airgun Umbilical</i> .....	80
<b>Tabel 4.19.</b> <i>Meshing Sensitivity Check</i> .....	93
<b>Tabel 4.20.</b> <i>Longitudinal Bending Moment</i> pada <i>Frame 23</i> .....	98
<b>Tabel 4.21.</b> Lokasi Titik-titik Penting pada <i>Frame 23</i> .....	99
<b>Tabel 4.22.</b> Momen Inersia Penampang <i>Frame 23</i> .....	99
<b>Tabel 4.23.</b> Tegangan Lentur pada <i>Frame 23</i> .....	99



# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang Masalah

Keterbatasan ruang untuk kegiatan eksplorasi minyak dan gas di daratan menggugah manusia untuk melakukan kegiatan eksplorasi minyak dan gas di lepas pantai. Kegiatan eksplorasi lepas pantai ini selalu dimulai dari kegiatan survei untuk mengetahui kondisi geologis di daerah tersebut dengan menggunakan kapal survei atau kapal riset (*survey/research vessel*). Salah satu survei yang paling umum digunakan adalah survei seismik. Survei seismik dilakukan untuk mengumpulkan data-data geoteknik di bawah dasar laut. Data-data ini diolah dan disajikan dalam bentuk gambar detail terkait konfigurasi lapisan batuan dan jenis batuan yang membentuknya. Gambar detail tersebut disajikan secara dua dimensi dan tiga dimensi, yang selanjutnya digunakan untuk mengetahui lokasi dan perkiraan ukuran *reservoir*. Kegiatan survei seismik ini merupakan salah satu cara yang cepat, efisien, dan akurat untuk menentukan lokasi dan ukuran *reservoir*, tanpa harus melakukan percobaan pengeboran berulang kali di lokasi yang belum diketahui.

Pemerintah Indonesia melalui Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) dan P3GL (Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi Kelautan) dalam upayanya untuk “melaksanakan litbang dan pemetaan geologi kelautan dan potensi energi sumber daya mineral kawasan pesisir dan laut” dan “memberikan kontribusi dalam perumusan evaluasi dan rekomendasi kebijakan potensi energi dan sumber daya mineral di wilayah landas kontinen Indonesia”, berencana menambah sebuah kapal riset dalam armada kapal penelitiannya yang bernama Geomarin IV. Kapal ini dibuat untuk memiliki kapasitas survei seismik yang lebih baik dari pendahulunya, Geomarin III. Geomarin IV direncanakan dengan panjang total kabel *streamer* tidak kurang dari 12000 meter, di mana Geomarin III hanya memiliki panjang total kabel *streamer* jauh lebih pendek. Dengan kapasitas *streamer* pada Geomarin IV, diharapkan kegiatan survei seismik akan lebih cepat, efisien, dan akurat, karena dapat mencakup wilayah yang lebih luas.



**Gambar 1.1.** Geomarin III

(sumber: *website resmi P3GL, Kementrian ESDM, 2016*)

Kegiatan survei seismik yang dilakukan pada Geomarin IV dimulai dengan membentangkan kabel *streamer* di permukaan laut sepanjang yang direncanakan, kemudian *airguns* dan *umbilicals*-nya dicelupkan ke permukaan laut. Baik *streamer* maupun *airguns* kesemuanya ditarik dari buritan kapal, lalu *airguns* menembakkan gelombang intensitas tinggi yang merambat melalui kolom air hingga menembus ke dalam lapisan tanah dasar laut. Gelombang ini akan terus menembus lapisan tanah hingga lapisan batuan keras (*impermeable rock*) yang kemudian terpantulkan kembali ke permukaan laut. Gelombang yang terpantul ini akan diterima oleh *hydrophones* yang terpasang di sepanjang *streamer*.

*Airgun umbilicals* dan *streamer* terhubung masing-masing pada konstruksi pondasi *winch roller* yang digunakan juga untuk menggulung *airgun umbilicals* dan *streamer* saat tidak digunakan. Konstruksi *winch roller* ini secara umum terdiri dari dua *roller*, beberapa pilar dan plat, serta beberapa *bracket* pondasi pada *main deck*. Konfigurasi yang sedemikian harus mampu menopang berat struktur itu sendiri (saat tidak melakukan survei seismik) sebagai beban internal dan gaya tarik saat *airgun umbilicals* atau *streamer* dibentangkan di permukaan laut (saat survei seismik dilakukan) sebagai gaya eksternal. Apabila terjadi kegagalan pada struktur tadi, maka kegiatan survei dapat terganggu dan terdapat implikasi pada Geomarin IV dalam memenuhi



funksinya sebagai kapal survei. Oleh karena itu analisis kekuatan konstruksi pondasi *winch roller* ini pada saat kapal beroperasi di laut sangat penting untuk dilakukan. Pada pengerjaan Tugas Akhir ini, konstruksi pondasi *winch roller* untuk *airgun umbilicals*-lah yang menjadi pokok bahasan.

Geomarin IV direncanakan untuk beroperasi di seluruh wilayah perairan Indonesia yang sekiranya akan dilakukan kegiatan survei seismik, sehingga dalam desainnya Geomarin IV dibuat agar mampu beroperasi di kondisi lingkungan perairan laut Indonesia yang paling ganas, namun masih merupakan kondisi di mana kegiatan survei masih memungkinkan untuk dilakukan, sebagai contoh adalah daerah Laut Arafuru.

## **1.2.Rumusan Masalah**

Berikut adalah beberapa masalah yang akan didiskusikan pada Tugas Akhir ini;

1. Bagaimana perilaku gerakan kapal Geomarin IV pada saat kegiatan survei seismik dilakukan?
2. Berapa besar gaya tarik yang terjadi pada *airgun umbilicals* saat kegiatan survei seismik dilakukan?
3. Berapa besar tegangan maksimum pada konstruksi pondasi *winch roller* untuk *airgun umbilicals* saat kegiatan survei seismik dilakukan?

## **1.3.Tujuan**

Dari rumusan masalah yang telah disebutkan sebelumnya, maka tujuan dari Tugas Akhir ini adalah;

1. Mengetahui perilaku gerakan Geomarin IV saat kegiatan survei seismik dilakukan.
2. Mengetahui besar gaya tarik yang terjadi pada *airgun umbilical* saat kegiatan survei seismik dilakukan.
3. Mengetahui besar tegangan maksimum pada konstruksi pondasi *winch roller* untuk *airgun umbilicals* saat kegiatan survei seismik dilakukan.

#### 1.4. Manfaat

Manfaat dari Tugas Akhir ini adalah dapat memberikan informasi terkait tegangan lokal pada konstruksi pondasi *winch roller* untuk *airgun umbilicals* saat beban internal dan beban eksternal bekerja secara simultan. Informasi ini selanjutnya dapat digunakan untuk mengetahui apakah konstruksi telah didesain sesuai dengan kebutuhannya saat beroperasi atau perlu dilakukan penyesuaian kembali.

#### 1.5. Batasan Masalah

Batasan masalah diterapkan untuk membatasi pembahasan yang terlalu luas. Berikut adalah batasan-batasan yang diterapkan dalam pengerjaan Tugas Akhir ini;

1. Diskusi yang dilakukan merupakan studi awal perancangan kapal survei Geomarin IV milik Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
2. Kondisi lingkungan yang diterapkan adalah lingkungan Laut Arafuru.
3. Arah beban-beban lingkungan dibatasi pada  $180^0$  (*head sea*) dan  $0^0$  (*following sea*).
4. Analisis dilakukan saat kondisi survei seismik dilakukan, yaitu ketika *airgun* dan *umbilicals*-nya ditarik pada kecepatan 5 knot dan *airgun umbilicals* terbentang sepanjang 90 meter di laut.
5. Efek *propeller* diabaikan dalam analisis gaya tarik.

#### 1.6. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan laporan pengerjaan Tugas Akhir ini dibagi menjadi beberapa bab sebagai berikut;

#### **BAB I PENDAHULUAN**

Pada bab ini penulis akan menjelaskan mengenai latar belakang dilakukannya pengerjaan Tugas Akhir, perumusan masalah, tujuan yang ingin dicapai penulis, manfaat yang diharapkan diperoleh dari pengerjaan Tugas Akhir ini, dan batasan-batasan masalah yang diterapkan selama pengerjaan Tugas Akhir,

## **BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI**

Bab ini berisi tinjauan pustaka dan studi literatur yang mengacu pada hal-hal yang digunakan sebagai landasan dalam pengerjaan Tugas Akhir. Referensi, teori dan persamaan-persamaan penting akan diberikan dalam bab ini. Bab ini disusun berdasarkan tinjauan pustaka dan studi literatur penulis dalam mempersiapkan Tugas Akhir.

## **BAB III METODOLOGI**

Bab ini menjelaskan tentang alur dan langkah-langkah pengerjaan Tugas Akhir. Alur disajikan secara sederhana dalam sebuah diagram alir atau *flow chart* dan disusun secara sistematis dalam setiap langkah pengerjaan Tugas Akhir.

## **BAB IV ANALISIS HASIL DAN PEMBAHASAN**

Pada bab ini berisi hasil dari pengerjaan Tugas Akhir beserta analisis dan pembahasannya sesuai dengan rumusan masalah yang dituliskan di awal. Bab ini dimulai dari pengolahan data hasil pengerjaan mulai pemodelan, simulasi analisis, dan keluaran untuk selanjutnya dijadikan kesimpulan.

## **BAB V KESIMPULAN**

Bab ini berisi tentang kesimpulan yang didapatkan dari serangkaian pengerjaan Tugas Akhir yang dilakukan. Dalam bab ini pula terdapat beberapa saran yang digunakan untuk penyempurnaan hasil dan sebagai evaluasi untuk Tugas Akhir dan penelitian-penelitian selanjutnya.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

#### 2.1. Tinjauan Pustaka

Analisis kekuatan konstruksi peralatan pendukung fungsi kapal sangatlah penting untuk menjaga keberfungsian kapal. Analisis ini perlu dilakukan dengan mempertimbangkan beban-beban hidrodinamis, interaksi antara beberapa objek terapung, dan pengaruhnya terhadap konstruksi.

Pada pengerjaan Tugas Akhir ini yang menjadi pokok pembahasan adalah analisis kekuatan konstruksi pondasi *winch roller* untuk *airgun umbilicals* yang digunakan untuk keperluan survei seismik pada kapal survei seismik Geomarin IV. *Airgun umbilicals* ini bersama dengan *streamer* akan ditarik di belakang kapal survei untuk melakukan kegiatan survei seismik. Interaksi antara *airgun umbilicals* yang ditarik terapung dan *winch roller* tempatnya ia terpasang di kapal perlu diperhatikan, karena keduanya saling merespon secara bebas terhadap gelombang. Hal ini menyebabkan studi tentang respon gerakan bangunan apung pada perairan gelombang sangatlah penting. Sebagai contoh apabila kapal pada saat tertentu merespon dengan gerakan maju, sementara pada saat yang sama *airgun umbilicals* merespon dengan gerakan mundur, maka tegangan pada *airgun umbilicals* akan semakin besar. Interaksi yang sedemikian rupa ini nantinya akan menyebabkan gaya tarik yang jauh lebih besar pada *winch roller*.

Milburn dan Fagot (1980) mengeluarkan sebuah catatan teknis (*technical notes*) terkait hal yang berhubungan dengan apa yang dibahas pada pengerjaan Tugas Akhir ini, namun yang menjadi pokok bahasannya adalah penentuan jenis *umbilical* yang digunakan pada sistem survei seismik serupa, beserta penentuan kecepatan tarik yang digunakan. Secara garis besar, untuk menentukan jenis *umbilical* dapat dilakukan dengan cara memperkirakan berapa gaya tarik kabel yang terjadi pada *umbilical* terlebih dahulu. Gaya yang diketahui digunakan untuk menentukan jenis *umbilical* yang dipakai, dengan menyesuaikan kekuatannya. Selain itu, diberikan pula beberapa persamaan

sederhana untuk mengetahui berapa gaya tarik yang terjadi pada *umbilical* saat menarik peralatan survei seismik dengan kecepatan tertentu.

Dalam mencapai tujuannya Milburn dan Fagot (1980) memvariasikan kecepatan tarik, kedalaman, dan kandidat jenis *umbilical* yang digunakan. Dari variasi kedalaman, diketahui bahwa semakin dalam objek yang ditarik, semakin terhambat laju kapal karena gaya-gaya hidrostatik dan hidrodinamis. Selain itu, perubahan kecepatan tarik akan berpengaruh pada gaya tarik yang terjadi di *umbilical* dan bentuk bentangannya saat ditarik. Dari variasi kecepatan tarik, diketahui bahwa semakin besar kecepatan tariknya maka semakin besar pula gaya tarik yang terjadi di *umbilical*.

Srivastava *et al.* (2011) melakukan penelitian terkait perilaku dinamis kabel yang ditarik di bawah permukaan laut. Penelitian tersebut dilakukan salah satunya untuk mengetahui gaya tarik kabel pada titik ikat (*tow point*) apabila kecepatan tariknya dipercepat dan diperlambat. Ketika kapal yang menarik dipercepat dari 4 m/s ke 12 m/s terjadi gaya tarik kabel maksimum sebesar kurang lebih 90 kN dan gaya tarik kabel minimum 13.1 kN. Hal yang menarik terjadi ketika kapal diperlambat dari 12 m/s ke 4 m/s, gaya tarik kabel maksimum yang terjadi pada *tow point* kurang lebih 170 kN sementara gaya tarik kabel minimum yang terjadi kurang lebih 50 kN. Sementara itu ketika kapal dipercepat kembali dari 4 m/s ke 12 m/s, gaya tarik kabel yang terjadi justru jauh lebih kecil, dengan gaya tarik kabel terbesar kurang lebih 48 kN dan gaya tarik kabel minimum kurang lebih 13 kN. Hal tersebut menunjukkan bagaimana interaksi antara dua benda yang terapung dan bergerak dengan kecepatan tertentu menyebabkan perubahan pada gaya tarik kabel di *tow point* yang berada di kapal. Pengetahuan ini akan sangat bermanfaat sebagai penunjang dalam pengerjaan Tugas Akhir ini, karena berkaitan dengan kabel yang ditarik dan gaya tarik yang disebabkannya pada titik tarik (*tow point*).

Seluruh penelitian yang dilakukan oleh Milburn dan Fagot (1980) dan Srivastava *et al.* (2011) menunjukkan bagaimana pengaruh laju kapal pada gaya tarik kabel antara dua benda yang terapung.

Masih berhubungan dengan topik Tugas Akhir yang dibahas, Sabana (2011) telah membahas bagaimana dinamisme di lautan dan interaksi antara

beberapa objek terapung dapat berpengaruh pada tegangan yang diterima oleh struktur *yoke arm external turret mooring* yang tersambung pada FPSO. Interaksi antara *external turret mooring* dan FPSO memberikan tegangan von Mises yang cukup signifikan pada *yoke arm*, sekitar kurang lebih 200 MPa. Sementara Irawati (2013) membahas kekuatan struktur *windlass* pada *bow* sebuah FSO Arco Ardjuna yang tertambat pada *single point mooring*. Dinamisme di lautan dan interaksi antara keduanya menyebabkan tegangan von Mises yang cukup signifikan pula, yaitu kurang lebih 199 MPa. Ketika tegangan yang terjadi pada struktur *windlass* melebihi kapasitas yang dapat diatasi olehnya, maka keberlangsungan operasi dapat terhambat.

Seluruh pembahasan yang dilakukan oleh Sabana (2011) dan Irawati (2013) menunjukkan betapa pentingnya mengetahui gaya tarik tali yang terikat pada struktur, sehingga kemungkinan terjadinya kegagalan pada struktur tadi dapat diminimalkan.

Dalam pengerjaan Tugas Akhir ini, salah satu objek pembahasannya adalah kapal survei seismik Geomarin IV milik Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral. Ahmad (2016) dan Wardana (2016) telah melakukan pembahasan mendalam terkait karakteristik gerakan kapal survei seismik Geomarin IV.

Wardana (2016) juga telah melakukan pembahasan tentang kekuatan konstruksi pondasi *winch roller* untuk *streamer* pada kapal survei seismik Geomarin IV. Pembahasan dilakukan ketika kapal sedang menarik *streamer* pada kecepatan 5 knot di perairan Laut Arafuru. *Streamer* yang dimodelkan berjumlah 4 *lines* dan begitu pula *airguns* juga dimodelkan bersama-sama dengan *streamer*. Dari analisis yang dilakukan, didapatkan bahwa tegangan von Mises maksimum yang terjadi pada konstruksi pondasi *winch roller* untuk *streamer* tersebut adalah kurang lebih 44 MPa, jauh lebih kecil daripada tegangan izin pada umumnya (190 – 200 MPa). Meski demikian, analisis kekuatan konstruksi pondasi *winch roller* tetap harus dilakukan untuk memastikan keberfungsian kapal.

## 2.2.Dasar Teori

### 2.2.1.Kapal Survei Seismik

Kapal survei memiliki berbagai macam fungsi yang secara umum digunakan untuk keperluan hidro-oseanografi dan geologi. Salah satu survei yang dilakukan adalah survei seismik, yaitu survei untuk mengetahui lapisan-lapisan tanah di bawah dasar laut dan jenis batuan yang membentuknya.

Kapal survei ini memiliki ruangan instrumen untuk keperluan survei yang dilengkapi dengan sistem kontrol dan perangkat komputer memadai. Selain itu kapal survei juga dapat mengakomodasi kru dan peneliti pada saat beroperasi. Pada geladak utama bagian belakang terdapat ruangan kerja untuk peralatan survei seismik seperti *airgun* dan *umbilicals*-nya serta *streamer*. Di geladak ini pula terdapat *winch roller airgun umbilicals* dan *winch roller streamer* berukuran besar sebagai tempat penyimpanan apabila peralatan tidak digunakan. Saat digunakan, *airgun umbilicals* dan *streamer* akan dibentangkan permukaan laut, dan ditarik oleh kapal survei pada kecepatan 4.5 – 5 knot. Secara umum survei seismik menggunakan *airgun* dan *umbilicals*-nya dapat dijelaskan sebagai berikut (Peralatan dan istilah-istilahnya dijelaskan secara detail pada bagian selanjutnya);

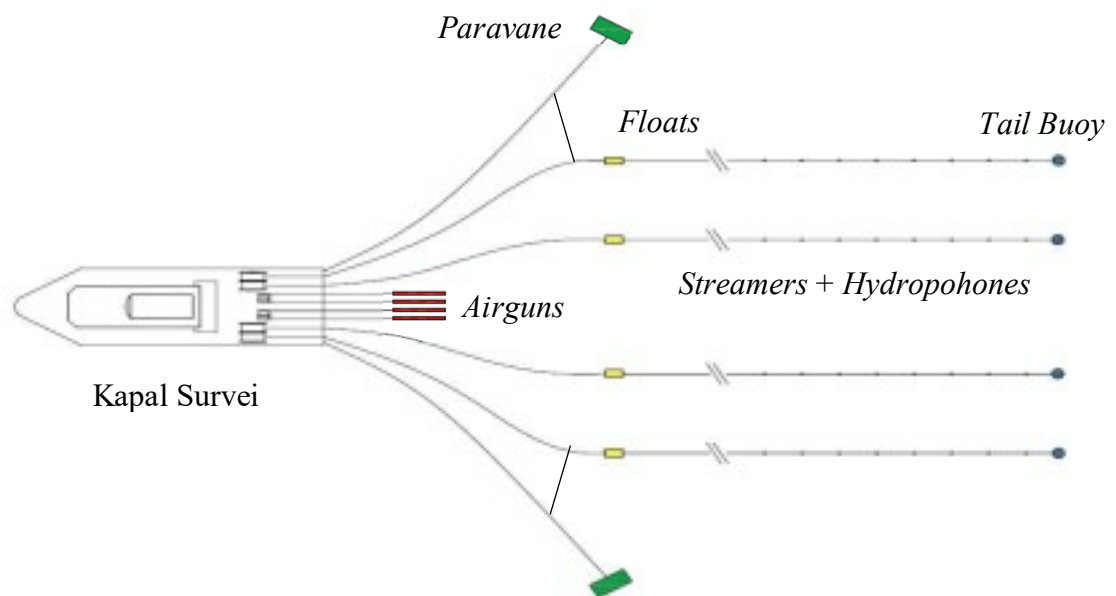
1. *Streamer* dibentangkan di permukaan laut. Pada *streamer* ini terdapat sensor *hydrophones* yang berguna sebagai penerima gelombang pantul.
2. *Airgun* dengan *umbilicals*-nya dibentangkan di permukaan laut. *Airguns* ini terhubung dengan kompresor melalui *umbilicals* yang bertujuan sebagai sumber tekanan.
3. Kedua peralatan di atas ditarik oleh kapal survei pada kecepatan tertentu ketika kegiatan survei dilakukan.
4. *Airguns* lalu menembakkan udara bertekanan tinggi yang energinya merambat dalam bentuk gelombang suara dan akan merambat ke dalam perairan dan menembus dasar laut.
5. Gelombang suara tersebut akan terus menembus lapisan-lapisan tanah di bawah dasar laut hingga akhirnya menabrak lapisan



batuan keras (*impermeable rock*). Ketika menabrak, gelombang suara akan dipantulkan kembali ke permukaan yang akan diterima oleh *hydrophones* pada *streamer*.

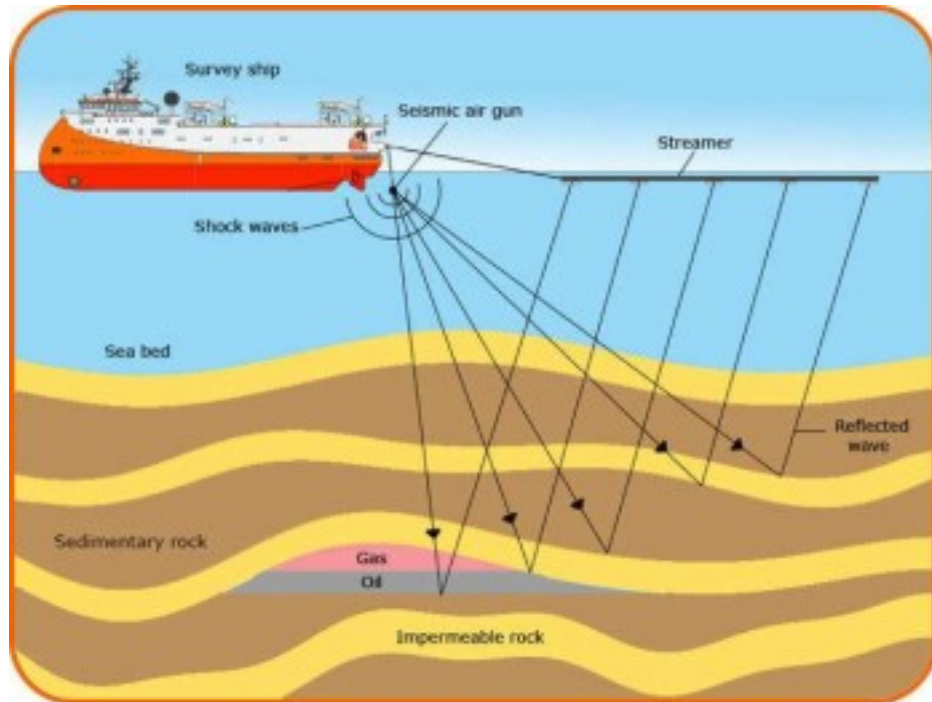
6. Selanjutnya *hydrophones* meneruskan gelombang tadi dalam bentuk transmisi data elektronik ke ruang instrumen untuk diolah dan disajikan dalam bentuk gambar detail dua dimensi dan tiga dimensi terkait konfigurasi lapisan tanah dan jenis batuan yang membentuknya.
7. Berdasarkan hasil survei yang dilakukan, dapat diketahui lokasi dan perkiraan ukuran *reservoir* secara detail dan efisien.

Saat survei seismik dilakukan, konfigurasi antara peralatan yang digunakan dapat dilihat pada sketsa sederhana di bawah ini,



**Gambar 2.1.** Konfigurasi *Airgun*, *Streamer*, *Tail Buoy*, dan *Barovane*  
(sumber: Dokumentasi Penulis, 2017)

dengan konfigurasi yang serupa untuk kapal survei Geomarin IV, yaitu dengan empat buah *array airguns* dan empat buah *streamer arrays*. Masing-masing dua buah pada sisi *starboard* dan *port*.



**Gambar 2.2.** Survei Seismik dengan *Airgun*  
(sumber: website resmi *Ocean Science Consulting*, 2015)

### 2.2.2. Peralatan Survei Seismik

Survei seismik dengan menggunakan gelombang suara seperti yang telah dijelaskan pada umumnya membutuhkan dua macam peralatan utama yaitu, *airgun umbilicals* dan *streamer*. Keduanya merupakan konfigurasi *umbilical*, yaitu kabel yang di dalamnya terdapat himpunan (*bundle*) kabel-kabel elektronik lebih kecil.



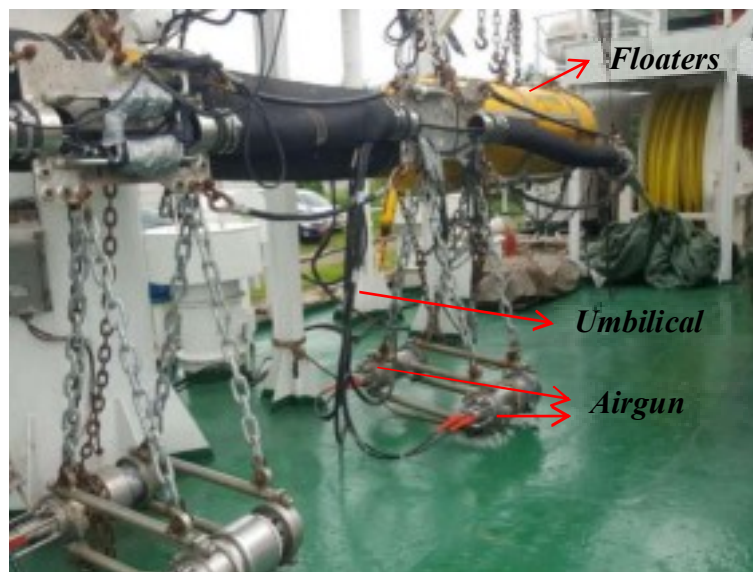
**Gambar 2.3.** *Umbilical* milik *Airgun*  
(sumber: *Sercel*, 2008)



**Gambar 2.4.** *Umbilical* milik *Streamer*  
(sumber: *Sercel*, 2008)

*Airgun* adalah suatu alat yang tersambung dengan kompresor melalui *umbilical* dan mampu menembakkan (*blast*) udara bertekanan tinggi ke dalam kolom air. Tekanan dapat diatur menyesuaikan kondisi namun harus tetap memperhatikan dampak gelombang suara yang dihasilkan terhadap keanekaragaman hayati di laut. Biasanya tekanan yang digunakan berkisar antara 2000 – 2500 psi yang dapat menghasilkan gelombang suara mencapai 220 dB. *Airgun umbilicals* digunakan bersama-sama dengan unit pelampung yang disebut sebagai *floaters*.

*Streamer* adalah *umbilical* yang di sepanjang bentangannya terdapat sensor-sensor penerima gelombang suara yang disebut sebagai *hydrophones*. Setiap *hydrophone* diletakan pada jarak yang cukup dekat berkisar antara 1 – 2 meter di bentangan *streamer*. Pada ujung paling belakang bentangan *streamer* biasanya dipasang sebuah alat yang bernama *tail buoy* yang dapat dioperasikan menggunakan *remote control*. *Tail buoy* ini berguna untuk menjaga *streamer* agar tidak saling menabrak ketika beroperasi. Sementara pada sayap-sayap konfigurasi *streamer* terdapat alat yang disebut sebagai *barovane/paravane*. Alat ini juga berfungsi untuk menjaga *streamer* agar tidak saling menabrak ketika beroperasi. *Barovane* dan *tail buoys* tidak terlalu dibahas dalam pengerjaan Tugas Akhir ini.

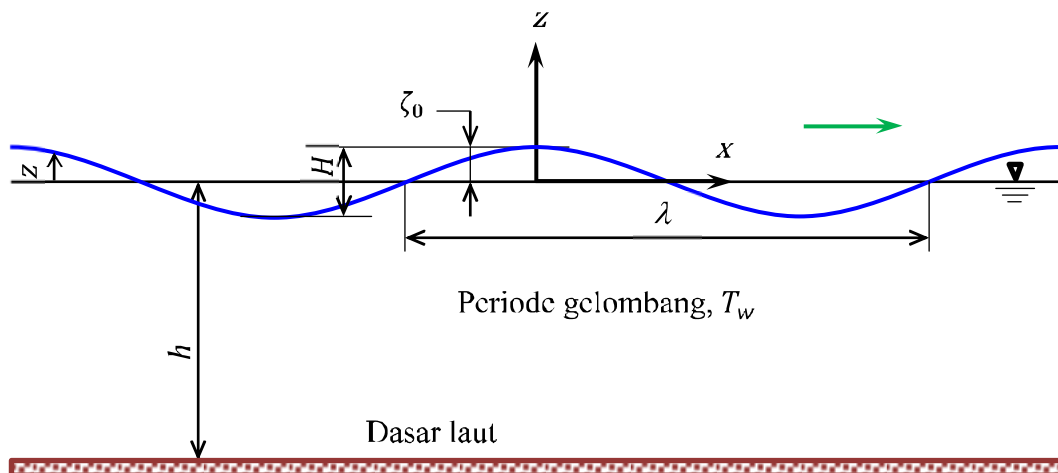


**Gambar 2.5.** *Airgun Umbilicals* dan *Floaternya*

(sumber: Sercel, 2017)

### 2.2.3. Teori Gelombang Linear

Teori gelombang merupakan suatu cara manusia untuk menjelaskan serta memperkirakan konsep dan perilaku gelombang di lautan secara analitis dan matematis, sehingga teori gelombang dapat digunakan bertujuan untuk ‘mematematiskan’ fenomena gelombang yang terjadi di laut. Terdapat banyak sekali teori gelombang yang telah dikembangkan, namun yang akan dibahas pada pengerjaan Tugas Akhir ini adalah teori gelombang reguler yang paling sederhana, yaitu teori gelombang linear Airy. Dalam teori ini perlu diketahui beberapa parameter-parameter dasar yang akan dijelaskan sebagai berikut,



**Gambar 2.6.** Parameter Umum Gelombang Reguler

(sumber: Perilaku dan Operabilitas Bangunan Laut di Atas Gelombang Acak, Djatmiko, 2012)

- $\lambda$  adalah panjang gelombang. Panjang gelombang didefinisikan secara sederhana sebagai jarak antara dua puncak gelombang (titik tertinggi) atau jarak antara dua lembah gelombang (titik terendah).

Panjang gelombang berhubungan dengan parameter angka gelombang ( $k$ ) dalam hubungan  $k = 2\pi/\lambda$ . Angka gelombang dapat dijelaskan sebagai jumlah siklus gelombang yang terjadi dalam satu meter, dengan demikian angka gelombang akan memiliki satuan rad/meter (rad/m).

- $T_w$  adalah periode gelombang. Periode gelombang didefinisikan sebagai waktu yang diperlukan untuk satu siklus gelombang

terjadi. Atau waktu yang diperlukan untuk dua puncak gelombang atau dua lembah gelombang melewati titik yang sama.

Periode gelombang berhubungan dengan frekuensi gelombang ( $\omega$ ) dalam hubungan  $\omega = 2\pi/T_w$ . Frekuensi gelombang dapat diartikan sebagai jumlah siklus gelombang yang terjadi dalam satu detik, dengan demikian frekuensi gelombang akan memiliki satuan rad/detik (rad/s).

- $H$  adalah tinggi gelombang. Tinggi gelombang didefinisikan secara mudah sebagai jarak antara puncak gelombang dan lembah gelombang.
- $\zeta_0$  adalah amplitude gelombang. Amplitude gelombang adalah jarak terjauh elevasi gelombang dari sumbu acuan (dalam hal ini adalah permukaan air tenang). Untuk gelombang reguler, maka amplitude gelombang nilainya sama dengan setengah tinggi gelombang itu sendiri ( $H/2$ ).

Teori gelombang linear Airy diwakilkan oleh suatu fungsi potensial, yaitu suatu fungsi yang apabila diturunkan terhadap suatu sumbu, didapatkan kecepatan pada sumbu itu. Fungsi potensial ( $\phi$ ) teori gelombang linear Airy dapat dituliskan sebagai berikut (dikatakan linear karena orde paling kecil pada fungsi potensial adalah satu, atau linear),

$$\phi = \frac{gH}{2\omega} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \sin(kx - \omega t) \quad (\text{Pers. 1})$$

dengan, hubungan fungsi potensial terhadap kecepatan sebagai berikut,

$$u = \frac{d\phi}{dx}; \quad v = \frac{d\phi}{dy}; \quad w = \frac{d\phi}{dz} \quad (\text{Pers. 2})$$

$\phi$ = fungsi potensial	$z$ = elevasi permukaan air (m)
$g$ = percepatan gravitasi ( $\text{m/s}^2$ )	$x$ = posisi horizontal (m)
$H$ = tinggi gelombang (m)	$t$ = waktu (s)
$\omega$ = frekuensi gelombang (rad/s)	$u$ = kecepatan partikel sumbu x (m/s)
$k$ = angka gelombang (rad/m)	$v$ = kecepatan partikel sumbu y (m/s)
$h$ = kedalaman perairan (m)	$w$ = kecepatan partikel sumbu z (m/s)

Parameter-parameter kinematis di atas apabila diturunkan terhadap waktu bisa didapatkan parameter dinamis seperti percepatan. Hal ini dituliskan sebagai berikut,

$$\dot{u} = \frac{dx}{dt}; \quad \dot{v} = \frac{dy}{dt}; \quad \dot{w} = \frac{dz}{dt} \quad (\text{Pers. 3})$$

$\dot{u}$  = percepatan partikel sumbu x ( $\text{m/s}^2$ )

$\dot{v}$  = percepatan partikel sumbu y ( $\text{m/s}^2$ )

$\dot{w}$  = percepatan partikel sumbu z ( $\text{m/s}^2$ )

Selain itu, konsep penting lainnya dalam hal interaksi gelombang pada suatu bangunan adalah tekanan dinamis karena gelombang ( $P_D$ ). Tekanan dinamis ini dapat dituliskan dalam persamaan berikut (Faltinsen, 1990),

$$P_D = \frac{\rho g H}{2} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \sin(kx - \omega t) \quad (\text{Pers. 4})$$

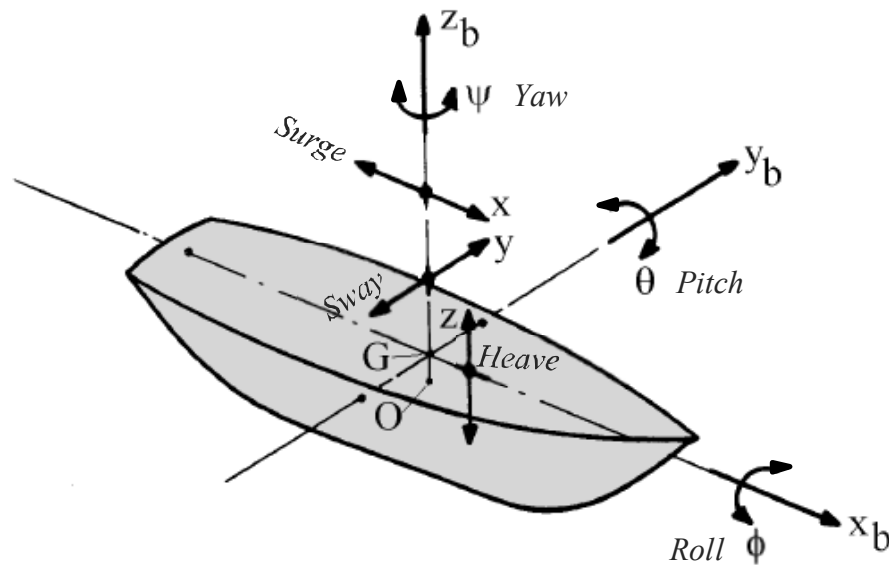
dengan  $\rho$  adalah massa jenis medium gelombang menjalar, yaitu massa jenis air laut. Persamaan tekanan dinamis tersebut dapat disimplifikasi untuk studi umum gerakan bangunan apung di perairan dalam (yaitu ketika perbandingan antara kedalaman dan panjang gelombang sangat besar, atau  $d/L \rightarrow \infty$ ), simplifikasinya menjadi,

$$P_D = \frac{\rho g H}{2} e^{kz} \sin(kx - \omega t) \quad (\text{Pers. 5})$$

Kesemua parameter-parameter di atas akan sangat penting dalam hal perhitungan interaksi gelombang pada suatu bangunan. Dalam hal ini yang dimaksud adalah gaya-gaya akibat gelombang pada bangunan yang mengapung di laut.

#### 2.2.4. Respon Bangunan Apung pada Gelombang Reguler

Sebuah bangunan terapung di perairan bergelombang akan mengalami respon berupa gerakan translasi dan rotasi di setiap sumbu utama bangunan. Perhatikan gambar berikut.



**Gambar 2.7.** Enam Derajat Kebebasan pada Bangunan Apung  
(sumber: *Offshore Hydromechanics*, Journee, 2001)

Pada dasarnya terdapat tiga sumbu utama, yaitu sumbu  $x$  yang positif ke arah haluan, sumbu  $y$  yang positif ke arah *port side*, dan sumbu  $z$  yang positif ke atas. Gerakan translasi yang dimaksud adalah, (notasi yang diberikan tidak berhubungan dengan notasi pada teori gelombang)

- *Surge* ( $x$ ), yaitu gerakan translasi titik acuan (pada umumnya titik berat bangunan apung/*center of gravity*) sepanjang sumbu  $x$ , atau bergesernya bangunan apung ke depan dan ke belakang.
- *Sway* ( $y$ ), yaitu gerakan translasi titik acuan (pada umumnya titik berat bangunan apung/*center of gravity*) sepanjang sumbu  $y$ , atau bergesernya bangunan apung secara menyamping.
- *Heave* ( $z$ ), yaitu gerakan translasi titik acuan (pada umumnya titik berat bangunan apung/*center of gravity*) sepanjang sumbu  $z$ , atau naik turunnya bangunan apung secara vertikal.

sementara gerakan rotasi yang dimaksud sebelumnya adalah sebagai berikut,

- *Roll* ( $\phi$ ), yaitu gerakan rotasi bangunan apung dengan sumbu  $x$  sebagai sumbu putarnya, seakan-akan sumbu  $x$  bangunan diputar ke arah *port* atau *starboard*.

- *Pitch* ( $\theta$ ), yaitu gerakan rotasi bangunan apung dengan sumbu  $y$  sebagai sumbu putarnya, seakan-akan sumbu  $y$  bangunan diputar ke arah haluan atau buritan.
- *Yaw* ( $\psi$ ), yaitu gerakan rotasi bangunan apung dengan sumbu  $x$  sebagai sumbu putarnya.

Dapat diperhatikan bahwa terdapat enam gerakan yang mungkin terjadi pada bangunan terapung di perairan bergelombang, sehingga bangunan terapung dapat dikatakan memiliki enam derajat kebebasan (*six degrees of freedom*).

Secara umum persamaan gerak respon suatu sistem pada gelombang reguler dapat dituliskan sebagai berikut (Bhattacharyya, 1978), dengan notasi  $\eta$  menunjukkan sumbu kebebasan tertentu,

$$a \frac{d^2(\eta)}{dt^2} + b \frac{d(\eta)}{dt} + c\eta = F_0 \cos \Omega t \quad (\text{Pers. 6})$$

$$a\ddot{\eta} + b\dot{\eta} + c\eta = F_0 \cos \Omega t \quad (\text{Pers. 7})$$

$a$  = komponen massa atau momen inersia (kg)

$b$  = komponen redaman/*damping* (N·s/m atau N·s/derajat)

$c$  = komponen kekakuan/*stiffness* (N/m atau N/derajat)

$\eta$  = respon pada derajat kebebasan ( $x, y, z, \phi, \theta, \psi$ ) (m atau derajat)

$F_0$  = amplitude gaya penggetar eksternal (N)

$\Omega$  = frekuensi gaya penggetar eksternal (rad/s)

$\dot{\eta}$  = kecepatan respon pada derajat kebebasan (m/s atau derajat/s)

$\ddot{\eta}$  = percepatan respon pada derajat kebebasan (m/s<sup>2</sup> atau derajat/s<sup>2</sup>)

Suku pertama ( $a\ddot{\eta}$ ) pada persamaan di atas disebut sebagai komponen gaya/momen inersia (*inertia force/moment*) karena berhubungan dengan massa dan percepatan. Pada bangunan apung, komponen gaya/momen inersia ini terdiri dari massa bangunan apung dan massa tambah untuk gerakan translasi, dan momen inersia bangunan apung untuk gerakan rotasi, yang dikalikan dengan percepatan respon pada derajat kebebasan tertentu.



Suku ke-dua ( $b\dot{\eta}$ ) disebut sebagai komponen gaya/momen redaman (*damping force/moment*) yang sifatnya meredam gerakan. Komponen ini akan menyebabkan *decay* atau penurunan intensitas gerakan. Pada bangunan apung, komponen redaman berhubungan dengan geometri struktur yang pada umumnya rumit untuk dilakukan secara manual.

Suku ke-tiga ( $c\eta$ ) disebut sebagai komponen gaya/momen kekakuan atau gaya/momen pengembali (*restoring force/moment*) yang sifatnya melawan gerakan untuk mengembalikannya ke posisi semula seperti halnya pada sebuah pegas. Pada bangunan apung, komponen ini terdiri dari gaya-gaya hidrostatik seperti gaya apung dan momen pengembali.

Suku yang berada di ruas kanan ( $F_0 \cos \Omega t$ ) disebut sebagai komponen gaya/momen penggetar atau gaya/momen eksitasi (*excitation force/moment*). Pada bangunan terapung, gaya dan momen yang dimaksud berasal dari gelombang yang menghempas di sepanjang badan bangunan apung. Gaya dan momen penggetar ini sifatnya periodik dan reguler yang ditandai dengan suku  $\cos \Omega t$ .

Perlu diperhatikan bahwa hanya tiga dari enam derajat kebebasan tadi yang merupakan gerakan osilasi murni, yaitu *heave* ( $z$ ), *roll* ( $\phi$ ), dan *pitch* ( $\theta$ ). Hal ini dikarenakan pada ketiga gerakan tadi terdapat komponen gaya/momen pengembali yang menjadikannya menjadi gerakan osilasi, di mana gaya/momen pengembali tersebut tidak ada pada gerakan *surge* ( $x$ ), *sway* ( $y$ ), dan *yaw* ( $\psi$ ) (Bhattacharyya, 1978). Ketiga gerakan yang disebut terakhir akan berubah menjadi gerakan osilasi apa bila terdapat gaya/momen eksternal yang sifatnya mengembalikan ke posisi setimbangnya.

Persamaan gerak murni pada setiap derajat kebebasan dibahas selanjutnya. Perlu diperhatikan dalam pembahasan persamaan gerak bangunan apung, diperkenalkan notasi angka *subscript* pada komponen-komponen persamaan gerak, di mana angka *subscript* 1 hingga 3 menunjukkan komponen untuk gerakan translasi *surge*, *sway*, dan *heave* berurutan, sementara 4 hingga 6 menunjukkan komponen untuk gerakan rotasi *roll*, *pitch*, dan *yaw* berurutan.

#### 2.2.4.1. Gerakan *Surge* ( $x$ ) Murni

Seperti yang dijelaskan sebelumnya, pada persamaan gerak *surge* tidak terdapat komponen gaya pengembali, sehingga persamaan geraknya (Pers. 7) dapat dituliskan menjadi,

$$a_1 \ddot{x} + b_1 \dot{x} = F_1 \cos \Omega t \quad (\text{Pers. 8})$$

Pada persamaan di atas,  $a_1$  adalah terdiri dari dari massa bangunan apung ( $M$ ) dan massa tambahannya untuk gerakan *surge* ( $M'_1$ ), sementara  $b_1$  yang merupakan redaman untuk gerakan *surge* didapatkan melalui percobaan atau pendekatan berdasarkan geometri bangunan apung. Suku  $F_1$  di ruas kanan merupakan amplitude dari gaya penggetar yang menyebabkan *surge* akibat tekanan hidrostatik dan tekanan dinamis gelombang. Penentuan gaya penggetar ini dapat menggunakan metode *strip* ataupun metode *panel*. Persamaan terakhir dapat dituliskan kembali menjadi,

$$(M + M'_1) \ddot{x} + b_1 \dot{x} = F_1 \cos \Omega t \quad (\text{Pers. 9})$$

#### 2.2.4.2. Gerakan *Sway* ( $y$ ) Murni

Seperti pada gerak *surge* yang tidak terdapat komponen gaya pengembali, persamaan gerak *sway* dapat dituliskan menjadi,

$$a_2 \ddot{y} + b_2 \dot{y} = F_2 \cos \Omega t \quad (\text{Pers. 10})$$

Pada persamaan di atas,  $a_2$  adalah jumlah dari massa bangunan apung ( $M$ ) dan massa tambahannya untuk gerakan *sway* ( $M'_2$ ), lalu  $b_2$  adalah redaman untuk gerakan *sway* yang nilainya bisa didapatkan dari percobaan ataupun pendekatan berdasarkan geometri bangunan apung. Analog seperti pada persamaan gerak *surge*, suku  $F_2$  pada persamaan di atas adalah amplitude gaya penggetar eksternal yang menyebabkan gerakan *sway*. Gaya penggetar ini terdiri dari gaya karena tekanan hidrostatik dan gaya karena tekanan dinamis gelombang, di mana

keduanya dapat dihitung dengan menggunakan metode *strip* ataupun metode *panel*. Persamaan terakhir dapat dituliskan kembali menjadi,

$$(M + M'_2)\ddot{y} + b_2\dot{y} = F_2 \cos \Omega t \quad (\text{Pers. 11})$$

#### 2.2.4.3. Gerakan *Heave* (z) Murni

*Heave*, seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, merupakan salah satu gerakan yang berosilasi karena memiliki kecenderungan untuk melawan gaya penggetar eksternal sehingga dapat kembali ke posisi setimbangnya. Kecenderungan ini berasal dari penambahan gaya apung saat bangunan apung bergerak secara vertikal (naik-turun) sehingga terdapat perubahan pada saratnya. Persamaan gerak untuk gerakan *heave* dapat dituliskan menjadi,

$$a_3\ddot{z} + b_3\dot{z} + c_3z = F_3 \cos \Omega t \quad (\text{Pers. 12})$$

Seperti pada persamaan gerak translasi sebelumnya,  $a_3$  adalah penjumlahan dari massa bangunan apung ( $M$ ) dan massa tambahnya untuk gerakan *heave* ( $M'_3$ ), kemudian  $b_3$  adalah redaman untuk gerakan *heave* yang dapat ditentukan dengan percobaan maupun pendekatan berdasarkan geometri bangunan apung. Redaman untuk *heave* dapat ditentukan secara numerik yang dikembangkan Salvesen *et al.* pada tahun 1970.

Perhatikan pada persamaan di atas terdapat komponen kekakuan  $c_3$  yang merupakan tambahan gaya apung ketika bangunan bergerak naik-turun. Kekakuan ini berperilaku seperti sebuah pegas yang apabila ditekan maka akan berusaha melawan hingga terjadi keseimbangan. Secara sederhana, suku ke-tiga atau komponen gaya pengembali untuk gerakan *heave* dapat dituliskan sebagai ( (Bhattacharyya, 1978) dan (Faltinsen, 1990)),

$$c_3z = \rho g A_{wp} z \quad (\text{Pers. 13})$$

di mana  $A_{wp}$  adalah luasan bidang garis air (*water plane area*) yang apabila dihubungkan dengan koefisien luas bidang garis air ( $C_{wp}$ ), persamaan terakhir dapat dituliskan kembali menjadi,

$$c_3 z = \rho g (L B C_{wp}) z \quad (\text{Pers. 14})$$

$$c_3 = \rho g (L B C_{wp}) \quad (\text{Pers. 15})$$

dengan  $L$  dan  $B$  masing-masing adalah panjang dan lebar bangunan apung. Perhatikan persamaan 13 kembali, suku  $A_{wp} z$  merupakan tambahan volume air yang dipindahkan karena adanya perubahan sarat air ketika bangunan apung bergerak naik-turun, yang apabila dikalikan dengan  $\rho g$  didapatkan gaya apung tambahan. Gaya apung tambahan inilah yang berperan sebagai gaya pengembali untuk gerakan *heave*.

$F_3$  pada ruas kanan pada persamaan gerak *heave* (Pers. 12), menunjukkan amplitude gaya penggetar yang menyebabkan gerakan *heave*. Seperti gerakan translasi lainnya, gaya penggetar ini terdiri dari gaya akibat tekanan hidrostatik dan gaya akibat tekanan dinamis gelombang, yang mana kedua gaya tersebut dapat dihitung menggunakan metode *strip* atau metode *panel* sesuai dengan kapasitas komputasi yang tersedia. Substitusi semua penjelasan komponen ke persamaan gerak *heave*, maka persamaan tersebut dapat dituliskan kembali menjadi,

$$(M + M'_3) \ddot{z} + b_3 \dot{z} + \rho g (L B C_{wp}) z = F_3 \cos \Omega t \quad (\text{Pers. 16})$$

#### 2.2.4.4. Gerakan *Roll* ( $\phi$ ) Murni

Persamaan gerak untuk gerakan rotasi adalah analog dengan persamaan gerak untuk gerakan translasi, yang berbeda secara umum adalah penggetar eksternalnya berupa momen, bukan gaya seperti yang terjadi pada gerakan translasi. Pada umumnya persamaan gerak untuk gerakan *roll* dapat dituliskan sebagai berikut (Bhattacharyya, 1978),

$$a_4 \ddot{\phi} + b_4 \dot{\phi} + c_4 \phi = F_4 \cos \Omega t \quad (\text{Pers. 17})$$

Komponen  $a_4$  pada persamaan di atas adalah penjumlahan dari momen inersia *roll* massa bangunan apung ( $I_{xx}$ ) dan momen inersia *roll* massa tambah ( $I'_{xx}$ ). Momen inersia massa secara umum adalah perkalian dari suatu massa ( $m$ ) dengan kuadrat jarak pusat massa ke sumbu netral atau sumbu putarnya ( $r^2$ ). Secara matematis momen inersia massa dapat dituliskan sebagai,

$$I_m = \int dm r_i^2 = m k_n^2 \quad (\text{Pers. 18})$$

di mana  $dm$  adalah massa elementer,  $r_i$  adalah jarak massa elementer ke sumbu netral, dan suku  $k_n$  disebut sebagai jari-jari girasi atau *radius of gyration*. Dari penjelasan di atas, Bhattacharyya menjelaskan bahwa momen inersia *roll* massa bangunan apung dapat dituliskan dalam persamaan berikut,

$$I_{xx} = M k_{xx}^2 \quad (\text{kg} \cdot \text{m}^2) \quad (\text{Pers. 19})$$

dengan  $k_{xx}$  adalah jari-jari girasi gerakan *roll* yang dapat dihitung secara numerik berdasarkan distribusi massa ( $m_i$ ) dan letak massa tadi terhadap sumbu  $x$ , atau dapat dituliskan sebagai berikut,

$$k_{xx}^2 = \frac{\sum m_i r_i^2}{M} = \frac{\sum m_i (y_i^2 + z_i^2)}{M} \quad (\text{Pers. 20})$$

$y_i$  dan  $z_i$  berurutan adalah posisi massa  $m_i$  pada koordinat  $y$  dan  $z$ . Dengan demikian persamaan komponen  $a_4$  dapat dituliskan kembali menjadi, (dengan  $M'_4$  adalah massa tambah untuk gerakan *roll*)

$$a_4 = I_{xx} + I'_{xx} = M k_{xx}^2 + M'_4 k'_{xx}^2 \quad (\text{Pers. 21})$$

Komponen  $b_4$  adalah redaman untuk gerakan *roll* yang dapat ditentukan dengan percobaan atau dengan pendekatan berdasarkan geometri bangunan apung. Sementara  $c_4$  adalah komponen kekakuan yang, seperti pada gerakan *heave*, merupakan tambahan gaya apung karena terjadi perubahan pada sarat bangunan apung saat terjadi

gerakan *roll*. Kekakuan ini berperilaku seperti pegas spiral yang apabila didorong ke kanan atau ke kiri akan melawan sehingga pegas kembali ke posisi seimbangnya. Gaya pengembali untuk gerakan *roll* (suku ke-tiga) pada persamaan gerak *roll* (Pers. 17) secara sederhana dapat dituliskan menjadi (Bhattacharyya, 1978),

$$c_4\phi = Mg \times \overline{GM}_T \sin \phi \quad (\text{Pers. 22})$$

atau, untuk sudut *roll* kecil,  $\sin \phi \approx \phi$ , sehingga,

$$c_4\phi = Mg \times \overline{GM}_T \phi \quad (\text{Pers. 23})$$

$$c_4 = Mg \overline{GM}_T \quad (\text{Pers. 24})$$

dengan  $M$  adalah massa bangunan apung,  $g$  adalah percepatan gravitasi, dan  $\overline{GM}_T$  adalah radius *metacenter* transversal bangunan apung. Sementara suku yang berada di ruas kanan adalah momen penggetar eksternal yang disebabkan oleh gayanakibat tekanan hidrostatis dan gaya akibat tekanan dinamis gelombang, dengan  $F_4$  adalah amplitude momennya. Apabila kita substitusikan penjelasan komponen-komponen di atas, persamaan gerak *roll* (Pers. 17) dapat dituliskan kembali menjadi,

$$(Mk_{xx}^2 + M'_4k'_{xx}{}^2)\ddot{\phi} + b_4\dot{\phi} + (Mg\overline{GM}_T)\phi = F_4 \cos \Omega t \quad (\text{Pers. 25})$$

#### 2.2.4.5. Gerakan *Pitch* ( $\theta$ ) Murni

Persamaan gerak *pitch* adalah analog dengan persamaan gerak *roll*, sebagai berikut,

$$a_5\ddot{\theta} + b_5\dot{\theta} + c_5\theta = F_5 \cos \Omega t \quad (\text{Pers. 26})$$

Seperti pada persamaan gerak *roll*,  $a_5$  pada persamaan di atas adalah penjumlahan dari momen inersia *pitch* massa bangunan apung ( $I_{yy}$ ) dan momen inersia *pitch* massa tambah ( $I'_{yy}$ ). Momen inersia *pitch* identik pula dengan momen (Bhattacharyya, 1978) inersia *roll*,

yang berbeda adalah jari-jari girasi yang ada pada persamaan momen inersia (Pers. 19). Jari-jari girasi untuk gerakan *pitch* ( $k_{yy}$ ) dapat dihitung secara numerik berdasarkan distribusi massa ( $m_i$ ) dan letak massa tersebut relatif terhadap sumbu  $y$ , hal ini dapat dituliskan secara matematis pada persamaan berikut,

$$k_{yy}^2 = \frac{\sum m_i r_i^2}{M} = \frac{\sum m_i (x_i^2 + z_i^2)}{M} \quad (\text{Pers. 27})$$

atau  $a_5$  dapat dituliskan kembali menjadi, (dengan  $M'_5$  adalah massa tambah gerakan *pitch*)

$$a_5 = I_{yy} + I'_{yy} = M k_{yy}^2 + M'_5 k'_{yy}^2 \quad (\text{Pers. 28})$$

Lalu untuk  $b_5$  atau redaman untuk gerakan *pitch* dapat ditentukan dengan percobaan atau dengan pendekatan berdasarkan geometri bangunan apung. Bhattacharyya menjelaskan hubungan antara redaman gerakan *heave* dengan redaman gerakan *pitch* sebagai bentuk penentuan awal nilai redaman ini, dan Salvesen *et al.* memberikan persamaan numerik untuk menentukan redaman gerakan *pitch*. Sementara  $c_5$  adalah kekakuan yang merupakan tambahan gaya apung karena terjadi perubahan pada sarat bangunan apung. Kekakuan ini memiliki perilaku seperti sebuah pegas yang apabila di dorong ke depan atau ke belakang akan berusaha untuk kembali ke posisi seimbangnya. Identik dengan gerakan *roll*, kekakuan gerakan *pitch* dapat dituliskan sebagai berikut (Bhattacharyya, 1978),

$$c_5 = M g \overline{GM}_L \quad (\text{Pers. 29})$$

dengan  $M$  adalah massa bangunan apung,  $g$  adalah percepatan gravitasi, dan  $\overline{GM}_L$  adalah radius *metacenter* longitudinal bangunan apung.

Ruas kanan pada persamaan gerak *pitch* merupakan momen penggetar eksternal yang disebabkan oleh gaya akibat tekanan hidrostatik dan gaya akibat tekanan dinamis gelombang, dengan

$F_5$  adalah amplitude momen tersebut. Apabila seluruh penjelasan di atas disubstitusikan, maka persamaan gerak *pitch* (Pers. 26) dapat dituliskan kembali menjadi,

$$(Mk_{yy}^2 + M'_5 k'_{yy}{}^2)\ddot{\theta} + b_5\dot{\theta} + (Mg\overline{GM}_L)\theta = F_5 \cos \Omega t \quad (\text{Pers. 30})$$

#### 2.2.4.6. Gerakan Yaw ( $\psi$ ) Murni

Persamaan gerak *yaw* adalah analog dengan persamaan gerak rotasi seperti sebelumnya, namun seperti yang telah dijelaskan bahwa persamaan gerak *yaw* tidak memiliki komponen gaya pengembali. Hal ini dapat dituliskan kembali sebagai berikut,

$$a_6\ddot{\psi} + b_6\dot{\psi} = F_6 \cos \Omega t \quad (\text{Pers. 31})$$

Pada persamaan di atas,  $a_6$  adalah penjumlahan dari momen inersia *yaw* massa bangunan apung ( $I_{zz}$ ) dan momen inersia *yaw* massa tambah ( $I'_{zz}$ ). Momen inersia *yaw* ini analog dengan momen inersia gerak rotasi lainnya, yang berbeda adalah penentuan jari-jari girasinya. Jari-jari girasi gerakan *yaw* dapat ditentukan berdasarkan distribusi massa ( $m_i$ ) dan posisi relatif massa tersebut terhadap sumbu  $z$  bangunan. Hal ini dapat dituliskan secara matematis sebagai berikut,

$$k_{zz}^2 = \frac{\sum m_i r_i^2}{M} = \sum \frac{m_i (x_i^2 + y_i^2)}{M} \quad (\text{Pers. 32})$$

dengan demikian,  $a_6$  dapat dituliskan kembali menjadi,

$$a_6 = I_{zz} + I'_{zz} = Mk_{zz}^2 + M'_6 k'_{zz}{}^2 \quad (\text{Pers. 33})$$

dengan  $M'_6$  adalah massa tambah untuk gerakan *yaw*. Sementara  $b_6$  adalah redaman untuk gerakan *yaw* yang dapat ditentukan dengan percobaan atau dengan pendekatan berdasarkan geometri bangunan apung.  $F_6$  pada ruas kanan persamaan gerak *yaw* adalah amplitude momen penggetar eksternal karena gaya akibat tekanan hidrostatik dan



gaya akibat tekanan dinamis gelombang. Berdasarkan penjelasan di atas, persamaan gerak *yaw* dapat dituliskan kembali menjadi,

$$(Mk_{zz}^2 + M'_6k'_{zz}{}^2)\ddot{\psi} + b_6\dot{\psi} = F_6 \cos \Omega t \quad (\text{Pers. 34})$$

#### 2.2.4.7. Gerakan Interaksi (*Coupled Motion*) Bangunan Apung

Persamaan gerak untuk setiap derajat kebebasan telah dijelaskan sebelumnya, namun persamaan-persamaan gerak tersebut merupakan penyederhanaan dalam kerangka sumbu utama bangunan apung tanpa adanya interaksi (*couple*) antara gerakan yang terjadi. Pada nyatanya sebuah bangunan apung yang berada pada perairan gelombang akan mengalami gerakan kopel (*coupled motion*) yang merupakan interaksi dari gerakan-gerakan murni. Persamaan umum untuk gerakan interaksi ini (Salvesen, Tuck, & Faltinsen, 1970),

$$\sum_{k=1}^6 [(M_{jk} + A_{jk})\ddot{\eta}_k + B_{jk}\dot{\eta}_k + C_{jk}\eta_k] = F_j e^{i\omega t} \quad (\text{Pers. 35})$$

$$j = 1, 2, \dots, 6$$

dengan  $M_{jk}$  adalah komponen matriks massa umum bangunan apung,  $A_{jk}$  adalah komponen matriks massa tambah, di mana penjumlahan dari keduanya disebut sebagai matriks *generalized mass matrix*. Lalu  $B_{jk}$  adalah komponen dari matriks redaman umum yang disebut sebagai *generalized damping matrix*, dan  $C_{jk}$  adalah komponen kekakuan umum yang disebut sebagai *generalized stiffness matrix*. Sementara  $F_j$  adalah komponen dari matriks total gaya/momen penggetar eksternal. Perhatikan pula bahwa  $\omega$  pada persamaan di atas adalah frekuensi gelombang yang merupakan frekuensi gaya penggetar eksternal (pada persamaan gerak murni disimbolkan sebagai  $(\Omega)$ ). Notasi *subscript*  $j$  dan  $k$  menunjukkan derajat kebebasan gerakannya, sama seperti saat menentukan persamaan gerak murni, yaitu 1 hingga 3 untuk gerakan tranlasi *surge*, *sway*, dan *heave* berurutan, sementara 4

hingga 6 untuk gerakan rotasi *roll*, *pitch*, dan *yaw* berurutan. Dengan demikian notasi *subscript jk* menunjukkan interaksi (*couple*) antar gerakan pada derajat kebebasan tertentu.

Respon gerakan pada awalnya diasumsikan memiliki bentuk dinamisme yang sama seperti penggetarnya, atau dapat dituliskan sebagai berikut ( (Chakrabarti, 1987) dan (Lewis, 1988)),

$$\eta_j = \bar{\eta}_j e^{i\omega t}; \quad j = 1, 2, \dots, 6 \quad (\text{Pers. 36})$$

dengan  $\bar{\eta}_j$  adalah amplitud respon (simpangan terjauh). Substitusikan persamaan di atas beserta turunannya terhadap waktu ( $\ddot{\eta}_j$  dan  $\dot{\eta}_j$ ) ke persamaan gerak interaksi (Pers. 35), sehingga persamaan tersebut dapat dituliskan kembali menjadi ( (Newman, 1977); (Chakrabarti, 1987), dan (Lewis, 1988)),

$$\sum_{k=1}^6 [-\omega^2 (M_{jk} + A_{jk}) + i\omega B_{jk} + C_{jk}] \bar{\eta}_k e^{i\omega t} = F_j e^{i\omega t} \quad (\text{Pers. 37})$$

$$j = 1, 2, \dots, 6$$

Apabila suku matriks di ruas kiri yang berada di dalam kurung siku ( $[ \dots ]$ ) kita sebut sebagai matriks total  $K_{kj}$ , dan membagi kedua ruas dengan  $e^{i\omega t}$ , maka persamaan di atas dapat disederhanakan menjadi,

$$\bar{\eta}_k \sum_{k=1}^6 [K_{jk}] = F_j; \quad j = 1, 2, \dots, 6 \quad (\text{Pers. 38})$$

Penyelesaian persamaan di atas adalah respon gerakan interaksi (*coupled motion*) bangunan apung pada perairan dengan gelombang reguler untuk masing-masing derajat kebebasannya, yang dapat dilakukan dengan *inverse* matriks atau metode-metode yang sudah ada.

$$\bar{\eta}_k = \sum_{k=1}^6 [K_{jk}]^{-1} F_j; \quad j = 1, 2, \dots, 6 \quad (\text{Pers. 39})$$

### 2.2.5. Response Amplitude Operator (RAO)

Pada umumnya, amplitud respon gerakan bangunan apung pada gelombang regular ( $\bar{\eta}_i$ ) dinormalkan (*normalized*) terhadap amplitud gelombang ( $\zeta_0$ ). Normalisasi yang dimaksud dilakukan dengan membandingkan respon bangunan apung dengan amplitud gelombang. Respon gerakan bangunan apung ini merupakan fungsi dari frekuensi gelombang seperti yang telah dijelaskan pada bagian sebelumnya, atau  $\bar{\eta}_k(\omega)$ . Apabila normalisasi dilakukan untuk rentang frekuensi tertentu, maka perbandingan tersebut disebut sebagai *Response Amplitude Operator* atau RAO, yang merupakan fungsi tak berdimensi. Hal ini dapat dituliskan sebagai berikut, untuk respon gerakan translasi,

$$RAO_i(\omega) = \frac{\bar{\eta}_i(\omega)}{\zeta_0} \text{ (m/m); } i = 1,2,3 \quad (\text{Pers. 40})$$

dan untuk respon gerakan rotasi, pembilang (amplitud gelombang) dikalikan dengan angka gelombang ( $k$  rad/m) untuk mendapatkan RAO yang tak berdimensi. RAO untuk gerakan rotasi terkadang dibiarkan dalam bentuknya yang bersatuan rad/m, namun sebagai bentuk konsistensi dengan penjelasan sebelumnya, maka RAO untuk gerakan rotasi dapat dituliskan sebagai berikut (Djarmiko, 2012),

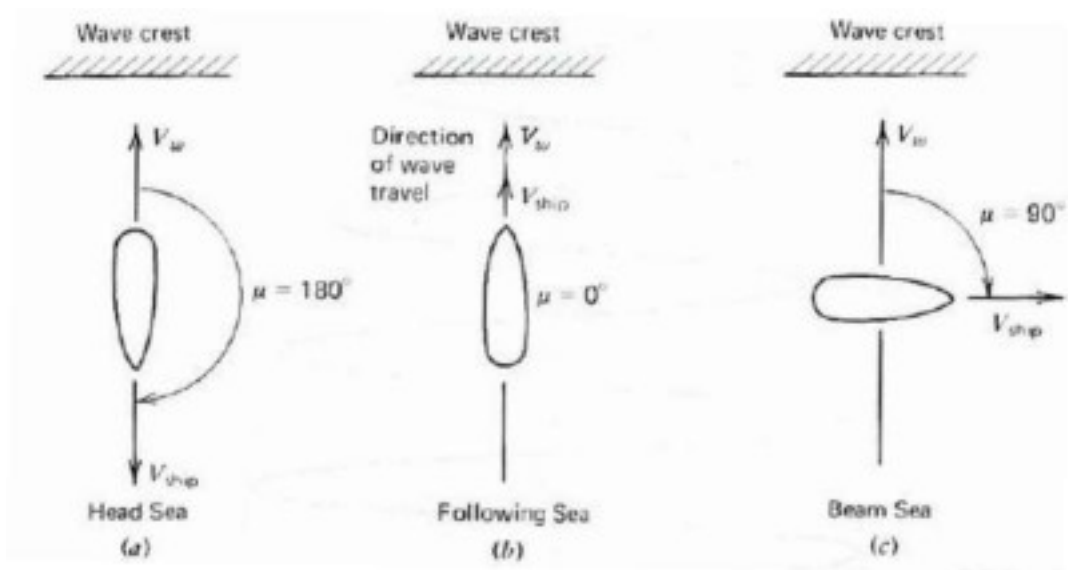
$$RAO_i(\omega) = \frac{\bar{\eta}_i(\omega)}{k\zeta_0} \text{ (rad/rad); } i = 4,5,6 \quad (\text{Pers. 41})$$

di mana dari keduanya didapatkan definisi secara sederhana dari RAO, yaitu besar respon gerakan bangunan apung per satu satuan amplitud gelombang. Sehingga dengan mengalikan RAO dengan amplitud gelombang, didapatkan respon gerakan yang terjadi. Definisi tersebut dapat dituliskan secara matematis sebagai berikut (Chakrabarti, 1987),

$$\text{respon} = RAO_i(\omega) \times \zeta_0 ; i = 1,2, \dots, 6 \quad (\text{Pers. 42})$$

Seluruh penjelasan di atas adalah untuk bangunan apung yang diam atau stasioner. Bangunan apung yang melaju dengan kecepatan  $V$  knot

dengan sudut papasan  $\mu^0$  terhadap arah datang gelombang (lihat **Gambar 2.8**. Ilustrasi Sudut Papasan ( $\mu$ ) terhadap Laju Bangunan Apung) akan memiliki RAO yang berbeda dari bangunan apung yang diam. Hal ini dikarenakan frekuensi gelombang yang menghempas bangunan apung akan berbeda, karena terjadinya perbedaan dalam kerangka waktu dan panjang gelombang efektif. Frekuensi gelombang yang menghempas bangunan apung yang melaju disebut sebagai frekuensi gelombang papasan atau *encountering frequency* ( $\omega_e$ ). Frekuensi gelombang papasan ini akan menggantikan unsur frekuensi gelombang biasa ( $\omega$ ) pada persamaan gerak bangunan apung, baik persamaan gerak murni ((Pers. 9), (Pers. 11), (Pers. 16), (Pers. 25), (Pers. 30), dan (Pers. 34)) maupun persamaan gerak interaksi (Pers. 37), apabila bangunan apung yang ditinjau sedang melaju di perairan bergelombang.



**Gambar 2.8.** Ilustrasi Sudut Papasan ( $\mu$ ) terhadap Laju Bangunan Apung  
(sumber: *Dynamics of Marine Vehicle*, Bhattacharyya, 1978)

Frekuensi gelombang papasan ( $\omega_e$ ) dapat dihitung dengan persamaan berikut ( (Bhattacharyya, 1978), dan (Djarmiko, 2012)),

$$\omega_e = \omega - \frac{\omega^2 V}{g} \cos \mu \quad (\text{Pers. 43})$$

Perlu ditekankan kembali bahwa RAO bisa dikatakan sebagai karakteristik respon gerakan bangunan apung, sehingga salah satu kegunaan utama RAO ini adalah untuk menerangkan bagaimana pengaruh gerakan bangunan apung pada keberfungsian (operabilitas) bangunan apung. Pengetahuan akan RAO akan sangat penting dalam menentukan respon gerakan bangunan apung pada kondisi laut yang lebih aktual. Hal ini akan dijelaskan pada bagian selanjutnya.

#### 2.2.6. Spektrum Gelombang

Bagian sebelumnya telah dijelaskan respon gerakan bangunan apung pada perairan yang diasumsikan bergelombang reguler, namun pada kenyataannya gelombang yang ada di perairan sama sekali tidak reguler. Untuk mendapatkan situasi yang dapat mewakili keacakan perairan yang sebenarnya, dikembangkanlah konsep spektrum gelombang yang akan dijelaskan selanjutnya.

Pada prinsipnya, gelombang acak yang terjadi di lautan merupakan superposisi dari gelombang-gelombang reguler yang jumlahnya tidak terbatas sehingga menghasilkan bentuk permukaan gelombang acak yang tidak pernah mengalami pengulangan. Dengan demikian terdapat salah satu cara yang mudah untuk menjelaskan keacakan ini, yaitu dengan total energi yang tersimpan di lautan bergelombang acak. Energi total ini merupakan jumlah dari energi komponen gelombang reguler yang membentuk gelombang acak. Energi per luasan permukaan dari satu komponen gelombang reguler dapat dituliskan sebagai berikut (Bhattacharyya, 1978),

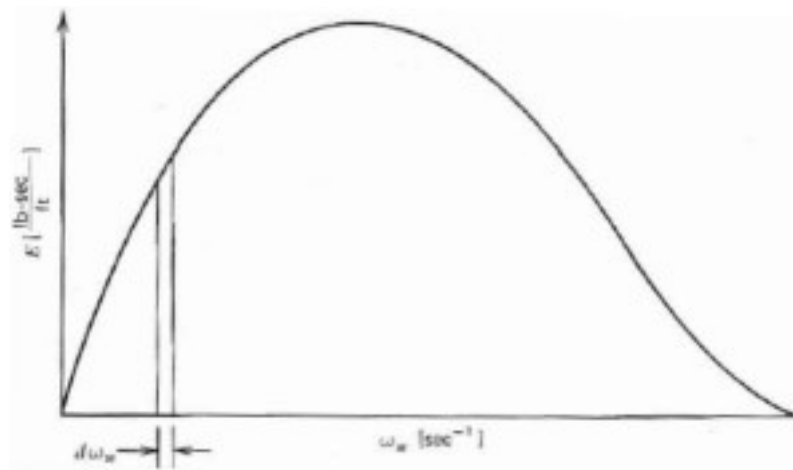
$$E_i = \frac{1}{2} \rho g \zeta_0^2 \quad (\text{N/m}) \quad (\text{Pers. 44})$$

dengan  $\rho$  adalah massa jenis air laut,  $g$  adalah percepatan gravitasi, dan  $\zeta_0$  adalah amplitude gelombang. Apabila terdapat banyak sekali komponen gelombang reguler dengan kombinasi amplitude dan frekuensi berbeda, maka setiap komponen gelombang reguler itu akan memiliki energi

masing-masing, sehingga energi total dari keseluruhan komponen gelombang reguler tersebut dapat dituliskan sebagai,

$$E_r = \frac{1}{2} \rho g \sum \zeta_0^2 \quad (\text{N/m}) \quad (\text{Pers. 45})$$

Energi tiap komponen gelombang reguler akan diplotkan dalam bentuk kurva, dengan besar energi ( $E_i$ ) yang dibagi dengan rentang frekuensi atau *frequency bandwidth* ( $d\omega$ , selisih antara frekuensi gelombang) sebagai ordinat (sumbu y) dan frekuensi gelombang ( $\omega$ ) sebagai absisnya (sumbu x). Kurva tadi dapat dikatakan merupakan distribusi energi pada setiap gelombang reguler dengan frekuensi tertentu. Kurva yang sedemikian ini kemudian disebut sebagai spektrum energi (*energy spectrum*), dengan  $E_i/d\omega$  (N-s/m) sebagai ordinat dan  $\omega$  (1/s) sebagai absisnya.



**Gambar 2.9.** Spektrum Energi

(sumber: *Dynamics of Marine Vehicle*, Bhattacharyya, 1978)

Karena di lautan yang benar-benar acak merupakan superposisi dari gelombang reguler yang jumlahnya mendekati tak terhingga, dan pola permukaan gelombangnya tidak akan pernah berulang, maka grafik yang dibuat memiliki rentang frekuensi yang sangat kecil. Hal ini dilakukan sebagai cara untuk menunjukkan bahwa di laut terdapat kontribusi dari seluruh frekuensi gelombang (mengikutsertakan seluruh frekuensi

gelombang). Dengan demikian, luasan di bawah kurva spektrum energi ini akan mewakili energi gelombang total yang ada di laut, atau,

$$E_T = \int_0^{\infty} (E_i/d\omega) d\omega \quad (\text{Pers. 46})$$

Ketika ordinat pada kurva spektrum energi tersebut dibagi dengan  $\rho g$  sehingga ordinatnya menjadi  $E_i/(\rho g \cdot d\omega)$  dan merekonstruksi kurva tadi, maka akan didapatkan suatu cara baru untuk menyajikan distribusi energi. Kurva baru inilah yang disebut sebagai spektrum gelombang atau *wave spectrum* dengan absisnya adalah frekuensi gelombang ( $\omega$ ) dan ordinatnya disebut sebagai *spectral density of wave energy* yang dinotasikan sebagai  $S(\omega)$ .

$$S(\omega) = \frac{1}{2} \frac{1}{d\omega} \zeta_0^2 \quad (\text{m}^2 \cdot \text{s}) \quad (\text{Pers. 47})$$

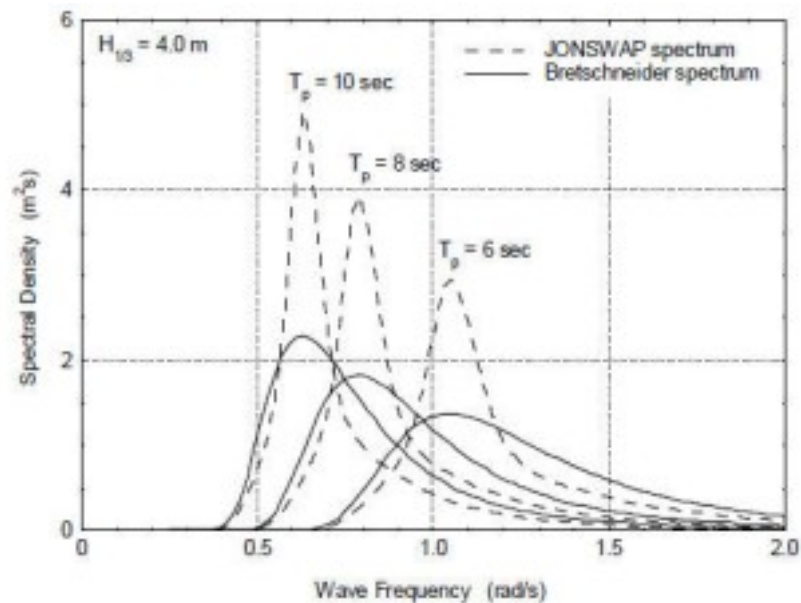
Sehingga luasan di bawah kurva spektrum energi atau energi total yang ada di laut (Pers. 46) dapat dituliskan kembali menjadi,

$$E_T = \rho g \int_0^{\infty} S(\omega) d\omega \quad (\text{Pers. 48})$$

Telah banyak model spektrum gelombang yang telah dikembangkan saat ini, seperti model spektrum Pierson-Moskowitz, ISSC/ITTC, JONSWAP, dll., namun dalam penggunaannya harus disesuaikan terhadap lokasi sebenarnya, apakah cukup mewakili atau tidak (Bhattacharyya, 1978).

Dalam pengerjaan Tugas Akhir ini, model spektrum yang diterapkan adalah model spektrum JONSWAP hasil penelitian di Laut Utara (*North Sea*) yang merupakan perairan tertutup dan sangat ganas. Model spektrum JONSWAP ini adalah pengembangan dari model spektrum Pierson-Moskowitz, yang dikalikan dengan faktor tertentu yang disebut sebagai *peak enhancement factor*, sehingga didapatkanlah model spektrum dengan kurva yang lebih memuncak daripada Pierson-Moskowitz.

Pada awalnya, model spektrum Pierson-Moskowitz adalah model untuk perairan terbuka, namun di sekitar Laut Utara terdapat banyak kepulauan sehingga model spektrum Pierson-Moskowitz kurang cocok. Oleh karena itu dilakukan penelitian kembali di daerah Laut Utara yang tertutup, yang hasilnya adalah model Spektrum JONSWAP. Dengan demikian, pemilihan model spektrum ini cocok untuk kondisi perairan di Indonesia yang merupakan perairan tertutup (dilingkupi oleh pulau-pulau) namun tidak seganas Laut Utara. Selain itu, penggunaan model spektrum ini adalah dengan alasan untuk meningkatkan keamanan. Meski begitu, penyesuaian harus tetap dilakukan untuk menghindari *overdesign* pada hal-hal tertentu.



**Gambar 2.10.** Contoh Spektrum JONSWAP  
(sumber: *Offshore Hydromechanics*, Journee, 2001)

Berikut ini adalah persamaan empiris untuk *spectral density of wave energy*  $S(\omega)$  model spektrum JONSWAP yang dikembangkan oleh Hassleman *et al.* dalam penelitiannya selama di Laut Utara pada tahun 1973 (Chakrabarti, 1987),

$$S_j(\omega) = \alpha \cdot g^2 \cdot \omega^{-5} \cdot \exp(Q_1) \cdot \gamma^{\exp(Q_2)} \quad (\text{Pers. 49})$$



dengan,

$$Q_1 = -\frac{5}{4} \left( \frac{\omega}{\omega_p} \right)^{-4} \quad Q_2 = -0.5 \left( \frac{\omega - \omega_p}{\sigma \omega_p} \right)^2$$

dan,

$$\alpha = 0.076(X_0)^{-0.02} \quad (\text{Pers. 50})$$

$$\omega_p = 2\pi \left( \frac{g}{U_w} \right) (X_0)^{-0.32} \quad (\text{Pers. 51})$$

$\gamma$  = parameter puncak (*peakedness parameter*)

$\omega_p$  = frekuensi puncak (*spectral peak frequency*)

$\sigma$  = parameter bentuk (*shape parameter*)

= 0.07 pada saat  $\omega \leq \omega_p$  dan 0.09 untuk lainnya

$X_0$  = panjang *fetch*

$U_w$  = kecepatan angin

$\alpha = 0.0081$  apabila  $X_0$  tidak diketahui

Penelitian lebih lanjut dilakukan terkait karakteristik kondisi ekstrim di beberapa lokasi sekitar Norwegia (Torsethaugen, Faanes, & Haver, 1985) yang salah satu hasilnya adalah menghubungkan parameter puncak ( $\gamma$ ) dengan periode puncak ( $T_p$ ) dan tinggi gelombang signifikan ( $H_s$ ) di lokasi tertentu. Hubungan ini dapat dituliskan sebagai berikut,

$$\gamma = \exp \left[ 3.4843 \left( 1 - 0.1975 \left( 0.036 - 0.0056 \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \right) \frac{T_p^4}{H_s^2} \right) \right] \quad (\text{Pers. 52})$$

Persamaan hubungan di atas hanya berlaku untuk periode puncak dengan satuan detik dan tinggi gelombang signifikan dengan satuan meter.

Dengan persamaan-persamaan di atas, dan dengan bantuan statistik didapatkan kurva spektrum gelombang dan informasi-informasi penting terkait perairan tersebut. Diperkenalkan pula parameter momen ke- $n$  dari luasan kurva yang dinotasikan sebagai  $m_n$  yang dituliskan sebagai berikut,

$$m_n = \int_0^{\infty} \omega^n \cdot S(\omega) d\omega \quad (\text{Pers. 53})$$

Perhatikan bahwa apabila momen ke-nol ( $n = 0$ ) atau  $m_0$  dikalikan dengan  $\rho g$  maka persamaan di atas akan sama dengan persamaan untuk menentukan luas di bawah kurva spektrum gelombang (Pers. 48). Informasi-informasi penting terkait tinggi gelombang yang bisa didapatkan dari spektrum gelombang disajikan dalam tabel berikut,

**Tabel 2.1.** Parameter-parameter Tinggi Gelombang dari Spektrum Gelombang  
(sumber: Perilaku dan Operabilitas Bangunan Laut di Atas Gelombang Acak, Djatmiko, 2012)

Paramater	Amplitudo	Tinggi
Gelombang Rata – rata	$1.25\sqrt{m_0}$	$2.5\sqrt{m_0}$
Gelombang Signifikan	$2.00\sqrt{m_0}$	$4.00\sqrt{m_0}$
Rata – rata 1/10 Gelombang Tertinggi	$2.55\sqrt{m_0}$	$5.00\sqrt{m_0}$
Rata – rata 1/1000 Gelombang Tertinggi	$3.44\sqrt{m_0}$	$6.67\sqrt{m_0}$

### 2.2.7. Respon Bangunan Apung pada Gelombang Acak

Secara umum metode untuk menentukan respon bangunan apung yang sedang melaju pada gelombang acak yang dapat dituliskan sebagai berikut (Bhattacharyya, 1978).

Tahap 1. Tentukan model spektrum gelombang yang tepat untuk lokasi perairan tempat bangunan apung beroperasi.

Tahap 2. Transformasikan model spektrum gelombang tadi menyesuaikan frekuensi gelombang papasan ( $\omega_e$ ). Hal ini dilakukan untuk menyesuaikan dengan kondisi saat bangunan apung bergerak. Luasan di bawah kurva spektrum gelombang yang ditransformasi adalah sama dengan kurva spektrum gelombang yang sebenarnya, karena sifat energi yang kekal, hanya distribusinya yang berubah.

Tahap 3. Persiapkan RAO untuk seluruh derajat kebebasan bangunan apung yang melaju seperti yang telah dijelaskan pada

bagian-bagian sebelumnya (RAO berdasarkan frekuensi gelombang papasan  $\omega_e$ ).

Tahap 4. Tentukan spektrum respon untuk setiap derajat kebebasan bangunan apung dengan cara mengalikan spektrum gelombang di tahap 2 dengan kuadrat dari RAO tahap 3. Dari spektra respon inilah didapatkan informasi terkait gerak bangunan apung pada gelombang acak.

Untuk mentransformasikan model spektrum gelombang menyesuaikan frekuensi gelombang papasan, dapat digunakan persamaan berikut ini (Bhattacharyya, 1978), (dengan  $S(\omega_e)$  adalah *spectral density* yang telah ditransformasikan),

$$S(\omega_e) = S(\omega) \times \frac{1}{\left[1 - \left(\frac{4\omega_e V}{g}\right) \cos \mu\right]^{0.5}} \quad (\text{Pers. 54})$$

Kemudian dengan mengalikan *spectral density* yang telah ditransformasikan tersebut dengan kuadrat RAO, maka didapatkanlah spektra respon bangunan apung untuk semua derajat kebebasan. Hal ini dituliskan sebagai berikut,

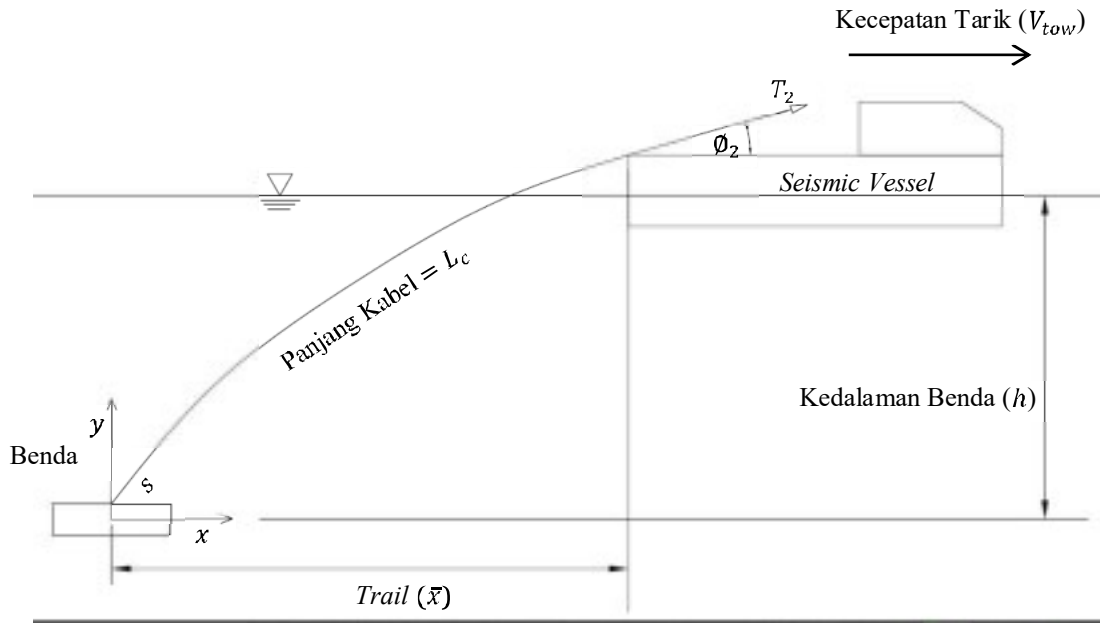
$$S_\eta(\omega_e) = S(\omega_e) \times (\text{RAO})^2 \quad (\text{Pers. 55})$$

dengan  $S_\eta(\omega_e)$  adalah *spectral density* untuk setiap derajat kebebasan  $\eta$ , sehingga didapatkan spektra respon untuk seluruh derajat kebebasan bangunan apung.

#### 2.2.8. Persamaan Kesetimbangan Kabel yang Ditarik di Laut

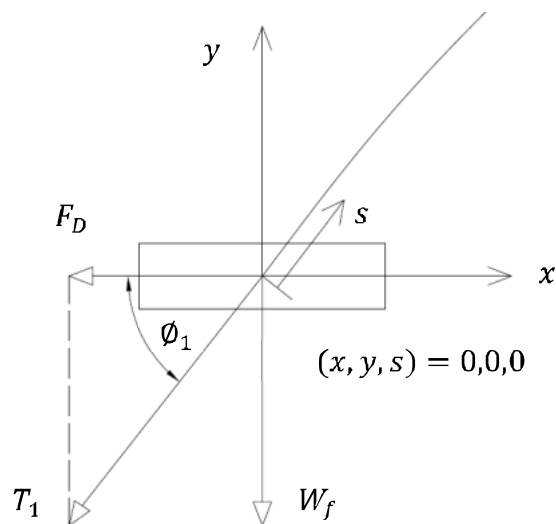
Milburn dan Fagot (1980) memberikan suatu persamaan sederhana untuk menghitung gaya pada kabel yang ditarik di laut. Misalkan benda yang ditarik menjadi pusat koordinat  $x$  horizontal,  $y$  vertikal, dan  $s$  lengkungan kabel, kemudian benda tadi tersambung dengan kabel sepanjang  $L_c$  dan

ditarik oleh kapal dengan kecepatan  $V_{tow}$ . Hal ini diilustrasikan lebih jelas pada gambar berikut.



**Gambar 2.11.** Ilustrasi Kabel yang Menarik Benda  
(sumber: Dokumentasi Penulis, 2017)

$T_2$  dan  $\phi_2$  adalah gaya tarik kabel dan sudut pada kapal (posisi  $x = \bar{x}$ ,  $y = h$ , dan  $s = L_c$ ), sementara pada benda,



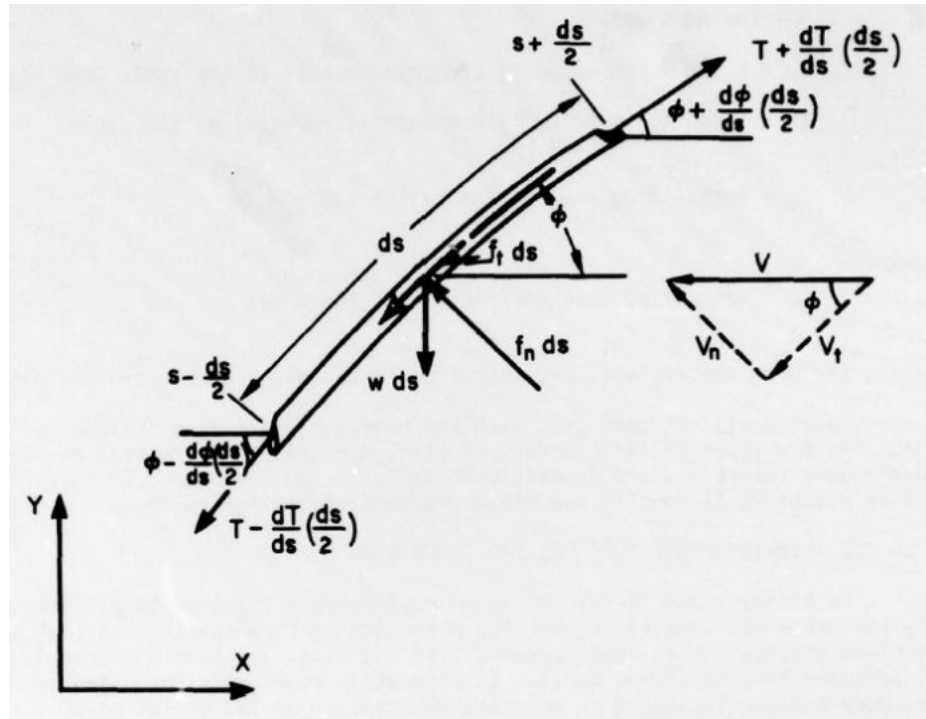
**Gambar 2.12.** Free Body Diagram pada Benda  
(sumber: Dokumentasi Penulis, 2017)

dapat diketahui dari gambar di atas hubungan-hubungan mengenai gaya tarik kabel dan sudut pada benda ( $T_1$  dan  $\phi_1$  berurutan) sebagai berikut (posisi  $x = 0$ ,  $y = 0$ , dan  $s = 0$ ),

$$T_1 = \sqrt{W_f^2 + F_D^2} \quad (\text{Pers. 56})$$

$$\phi_1 = \tan^{-1} \left( \frac{W_f}{F_D} \right) \quad (\text{Pers. 57})$$

Misalkan kita ambil elemen kecil kabel sepanjang  $ds$  dan sudut  $\phi$ , dengan perbedaan sudut yang sangat kecil ( $d\phi \rightarrow 0$ ) pada posisi tertentu seperti gambar berikut,



**Gambar 2.13.** Elemen Kecil Kabel Sepanjang  $ds$  dan sudut  $\phi$

(sumber: Milburn dan Fagot, 1980)

maka resultan dari gaya pada arah tangensial kabel dapat dituliskan sebagai berikut,

$$T \frac{d\phi}{ds} = -f_n + w \cos \phi \quad (\text{Pers. 58})$$

dengan  $f_n$  adalah gaya *drag* per satuan panjang pada arah normal kabel,  $w$  adalah berat per satuan panjang kabel dalam air laut, dan  $T$  adalah gaya tarik kabel pada posisi tertentu.

Resultan dari gaya pada arah normal kabel dapat dituliskan sebagai berikut,

$$\frac{dT}{ds} = f_t + w \sin \phi \quad (\text{Pers. 59})$$

dengan  $f_t$  adalah gaya *drag* per satuan panjang pada arah tangensial kabel. Gaya *drag* pada arah normal dan tangensial kabel dapat dituliskan sebagai berikut (Milburn & Fagot, 1980),

$$f_n = \frac{1}{2} \rho C_n D_t V_n^2 = \frac{1}{2} \rho C_n D_t (V_{tow} \sin \phi)^2 \quad (\text{Pers. 60})$$

$$f_t = \frac{1}{2} \rho C_t (\pi D_t) V_t^2 = \frac{1}{2} \rho C_t (\pi D_t) (V_{tow} \cos \phi)^2 \quad (\text{Pers. 61})$$

$C_n$  = koefisien *drag* arah normal kabel

$C_t$  = koefisien *drag* arah tangensial kabel

$D_t$  = diameter kabel

Penyelesaian seluruh persamaan di atas ((Pers. 58) hingga (Pers. 61)) dilakukan dengan mengaplikasikan syarat batas bahwa pada posisi  $x = 0$ ,  $y = 0$ , dan  $s = 0$  terdapat suatu benda yang ditarik, yaitu seperti pada persamaan 56 dan 57. Untuk memudahkan perhitungan, gaya *drag* pada arah tangensial dianggap konstan (Berteaux, 1976), sehingga resultan gaya ((Pers. 58) dan (Pers. 59)) dapat dituliskan kembali menjadi,

$$\frac{1}{ds} = \frac{-f_n + w \cos \phi}{T d\phi} \quad (\text{Pers. 62})$$

$$\frac{dT}{ds} = f_t + w \sin \phi \quad (\text{Pers. 63})$$

Substitusikan pernyataan  $1/ds$  dari persamaan 62 ke persamaan 63, akan didapatkan hubungan sebagai berikut,

$$\frac{1}{T} dT = \frac{f_t + w \sin \phi}{-f_n + w \cos \phi} d\phi \quad (\text{Pers. 64})$$

Integralkan persamaan di atas untuk satu elemen sepanjang  $s$  dari pusat koordinat, di mana batas bawahnya adalah  $T_1$  (Pers. 56) dan  $\phi_1$  (Pers. 57), yaitu gaya tarik kabel dan sudut kabel pada benda, sementara batas atasnya adalah gaya tarik dan sudut pada posisi  $s$  dari pusat koordinat ( $T$  dan  $\phi$ ).

$$\int_{T_1}^T \frac{1}{T} dT = \int_{\phi_1}^{\phi} \frac{f_t + w \sin \phi}{-f_n + w \cos \phi} d\phi \quad (\text{Pers. 65})$$

Dengan mengetahui bahwa  $\int 1/x dx = \ln x$ , dan memisalkan  $R = \frac{1}{2} \rho C_n D_t V_{tow}^2$ , lalu mengalikan ruas kanan dengan  $R/R$ , maka,

$$\frac{T}{T_1} = \exp \int_{\phi_1}^{\phi} \frac{\frac{f_t}{R} + \frac{w}{R} \sin \phi}{-\sin^2 \phi + \frac{w}{R} \cos \phi} d\phi \quad (\text{Pers. 66})$$

Dari persamaan 58,

$$ds = \frac{T d\phi}{-R \sin^2 \phi + w \cos \phi} \quad (\text{Pers. 67})$$

Substitusikan definisi  $T$  dari persamaan 66 ke persamaan 67, sehingga,

$$ds = \frac{T_1 \exp \int_{\phi_1}^{\phi} \frac{\frac{f_t}{R} + \frac{w}{R} \sin \phi}{-\sin^2 \phi + \frac{w}{R} \cos \phi} d\phi}{R \left( -\sin^2 \phi + \frac{w}{R} \cos \phi \right)} d\phi \quad (\text{Pers. 68})$$

yang apabila diintegralkan menjadi,

$$\frac{Rs}{T_1} = \int_{\phi_1}^{\phi} \frac{\exp \int_{\phi_1}^{\phi} \frac{\frac{f_t}{R} + \frac{w}{R} \sin \phi}{-\sin^2 \phi + \frac{w}{R} \cos \phi} d\phi}{-\sin^2 \phi + \frac{w}{R} \cos \phi} d\phi \quad (\text{Pers. 69})$$

Dari gambar 3.13, hubungan antara posisi  $s$  dengan koordinat  $x$  dan  $y$  dapat dituliskan sebagai berikut,

$$dx = ds \cos \phi \quad dy = ds \sin \phi$$

substitusikan hubungan di atas ke persamaan 69, maka didapatkan hubungan sebagai berikut,

$$\frac{Rx}{T_1} = \int_{\phi_1}^{\phi} \frac{\exp \int_{\phi_1}^{\phi} \frac{\frac{f_t}{R} + \frac{w}{R} \sin \phi}{-\sin^2 \phi + \frac{w}{R} \cos \phi} d\phi}{-\sin^2 \phi + \frac{w}{R} \cos \phi} \cos \phi d\phi \quad (\text{Pers. 70})$$

dan,

$$\frac{Ry}{T_1} = \int_{\phi_1}^{\phi} \frac{\exp \int_{\phi_1}^{\phi} \frac{\frac{f_t}{R} + \frac{w}{R} \sin \phi}{-\sin^2 \phi + \frac{w}{R} \cos \phi} d\phi}{-\sin^2 \phi + \frac{w}{R} \cos \phi} \sin \phi d\phi \quad (\text{Pers. 71})$$

Integral utama pada empat persamaan yang telah dijelaskan sebelumnya (Pers. 66, Pers. 69, Pers. 70, dan Pers. 71) adalah yang disebut dengan *cable functions*. Integrasi dilakukan secara numerik tergantung pada syarat batas integral dan dapat digunakan untuk menghitung gaya tarik pada kabel. Secara umum perhitungan ini dilakukan dengan bantuan komputer.

## 2.2.9. Tegangan pada Struktur

### 2.2.9.1. Hukum Hooke

Hukum Hooke menjelaskan tentang hubungan antara tegangan dan regangan pada suatu material. Hooke menuliskan hubungan ini secara matematis sebagai berikut (notasi yang diberikan tidak berhubungan dengan notasi pada penjelasan gelombang dan penjelasan gerak bangunan apung),



$$\sigma = E\varepsilon \quad \text{dan} \quad \tau = G\gamma \quad (\text{Pers. 72})$$

dengan  $\sigma$  dan  $\tau$  ( $\text{N/m}^2$ ) adalah tegangan normal dan tegangan geser,  $E$  ( $\text{N/m}^2$ ) adalah modulus elastisitas material (modulus Young),  $G$  ( $\text{N/m}^2$ ) adalah modulus elastisitas geser material (*modulus of rigidity*), serta  $\varepsilon$  dan  $\gamma$  berurutan adalah regangan normal dan regangan geser. Dari persamaan di atas diketahui bahwa deformasi yang terjadi akan berubah secara linear bersama tegangan. Deformasi ini dikontrol oleh jenis materialnya, yaitu modulus Young dan *modulus of rigidity* ( $G$ ). Hubungan di antara keduanya dapat dituliskan sebagai berikut,

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (\text{Pers. 73})$$

di mana  $\nu$  adalah *Poisson ratio*, yaitu perbandingan antara regangan lateral dan regangan aksial.

Terdapat tiga komponen tegangan normal (masing-masing terjadi pada dua sisi, simetris) dan tiga komponen tegangan geser (masing-masing terjadi pada dua sisi, simetris). Tegangan normal ini terdiri dari tegangan normal sumbu x ( $\sigma_x$ ), tegangan normal sumbu y ( $\sigma_y$ ), dan tegangan normal sumbu z. ( $\sigma_z$ ). Sementara tegangan geser terdiri dari tegangan geser pada bidang x ke arah sumbu y ( $\tau_{xy}$ ), tegangan geser pada bidang y arah sumbu z ( $\tau_{yz}$ ), dan tegangan geser pada bidang z ke arah sumbu x ( $\tau_{zx}$ ). Perlu diketahui bahwa penamaan bidang di sini berdasarkan dari sumbu normal bidang, yang berarti misalkan bidang  $x$  berarti sumbu normal bidang tersebut ke arah sumbu  $x$  dan bidang tersebut berada pada sisi  $zy$ .

Secara umum persamaan Hooke (Pers. 72) untuk elemen tiga dimensi (beserta geseran/*shear*) dapat dituliskan kembali sebagai berikut,

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \quad (\text{Pers. 74})$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)] \quad (\text{Pers. 75})$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] \quad (\text{Pers. 76})$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G} \quad (\text{Pers. 77})$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G} \quad (\text{Pers. 78})$$

$$\gamma_{xz} = \frac{\tau_{xz}}{G} \quad (\text{Pers. 79})$$

Persamaan di atas dapat dituliskan kembali bentuk *inverse*-nya sebagai berikut,

$$\sigma_x = \frac{E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} [(1 - \nu)\varepsilon_x + \nu\varepsilon_y + \nu\varepsilon_z] \quad (\text{Pers. 80})$$

$$\sigma_y = \frac{E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} [\nu\varepsilon_x + (1 - \nu)\varepsilon_y + \nu\varepsilon_z] \quad (\text{Pers. 81})$$

$$\sigma_z = \frac{E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} [\nu\varepsilon_x + \nu\varepsilon_y + (1 - \nu)\varepsilon_z] \quad (\text{Pers. 82})$$

$$\tau_{xy} = G\gamma_{xy} \quad (\text{Pers. 83})$$

$$\tau_{yz} = G\gamma_{yz} \quad (\text{Pers. 84})$$

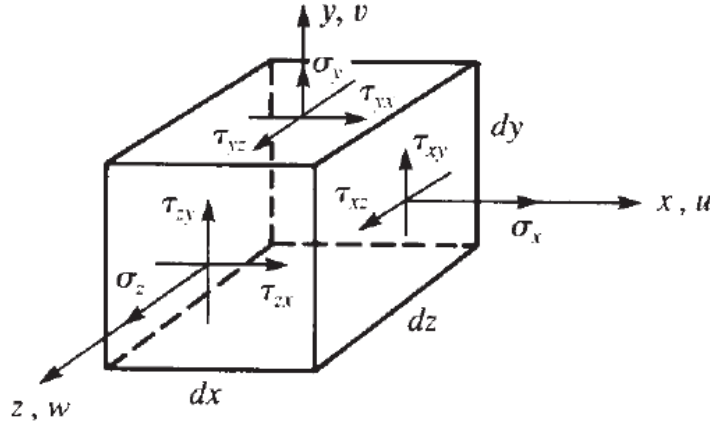
$$\tau_{xz} = G\gamma_{xz} \quad (\text{Pers. 85})$$

#### 2.2.9.2. Tegangan Von Mises ( $\sigma_v$ )

Pada suatu elemen tiga dimensi, dengan bantuan metode elemen hingga didapatkan tegangan-tegangan yang terjadi pada setiap sisi elemen tersebut.

Metode elemen hingga menghitung seluruh komponen tegangan yang terjadi, namun desainer membutuhkan suatu harga tegangan yang bisa digunakan sebagai acuan dalam menilai kekuatan struktur terhadap tegangan izin (*allowable stress*) atau tegangan lelehnya (*yield stress*), oleh karena itu tegangan von Mises dikembangkan. Tegangan von Mises adalah tegangan yang merupakan kombinasi dari seluruh

komponen tegangan (normal dan geser) elemen dan tidak memiliki arah, oleh sebab itu terkadang tegangan ini disebut sebagai tegangan uniaksial (*uniaxial stress*).



**Gambar 2.14.** Tegangan Normal dan Geser pada Elemen Tiga Dimensi  
(sumber: *A First Course in the Finite Element Method*, Logan, 2011)

Tegangan von Mises ( $\sigma_v$ ) dikembangkan oleh Richard von Mises dari teori energi distorsi (*distortion energy theory*). Energi distorsi adalah energi yang diperlukan oleh suatu material untuk mengalami deformasi bentuk. Apabila terjadi distorsi (gangguan dari luar berupa gaya) maka bentuk dari material akan berubah namun volumenya tidak akan berubah. Von Mises menghitung energi distorsi per satuan volume yang dibutuhkan lalu menggunakannya untuk menghitung tegangan ekuivalen yang menyebabkan deformasi bentuk yang terjadi. Apabila energi distorsi von Mises lebih besar daripada energi distorsi yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi leleh (*yield point*), maka struktur tadi dikatakan gagal. Tegangan von Mises ( $\sigma_v$ ) dapat dihitung dengan persamaan berikut ini dengan satuan  $N/m^2$ ,

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy} + \tau_{yz} + \tau_{zx})^2}{2}} \quad (\text{Pers. 86})$$

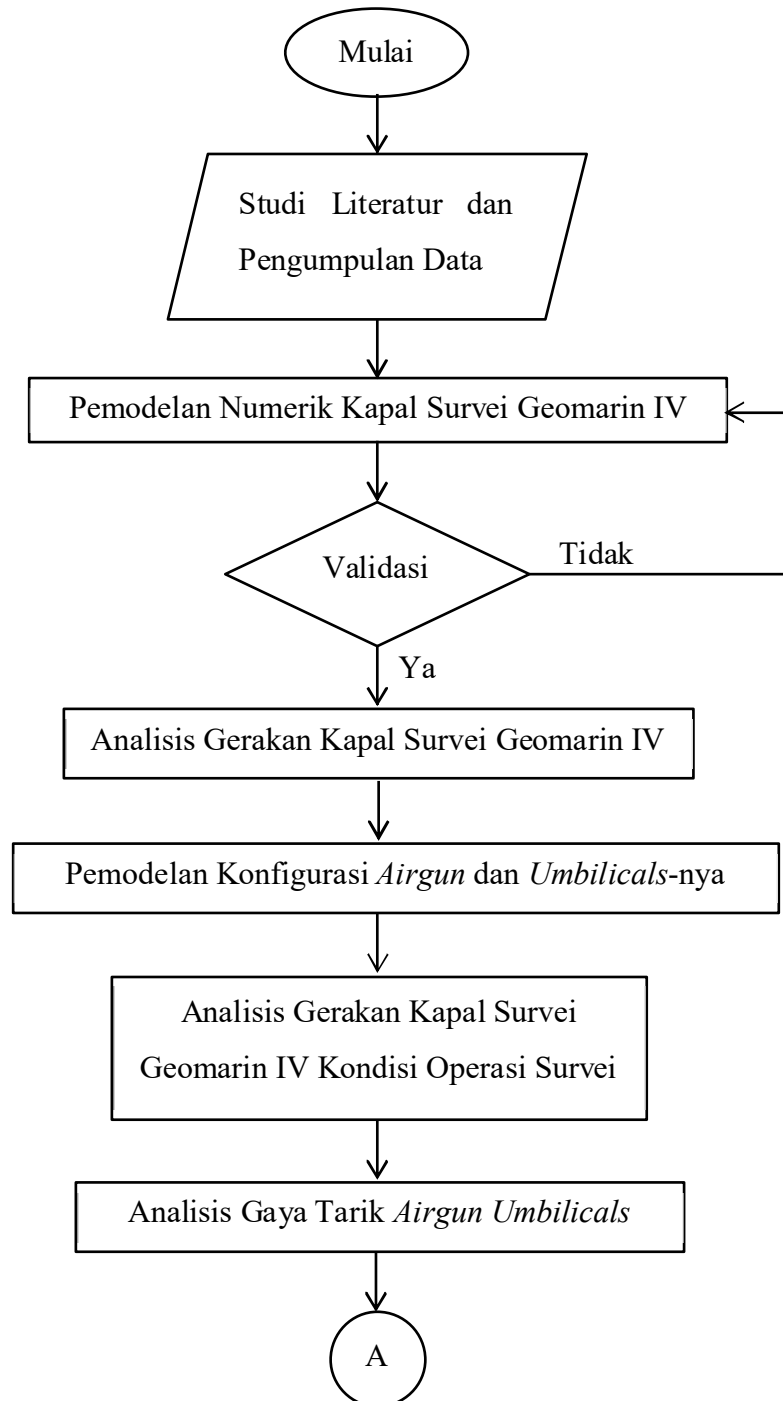
*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BAB III

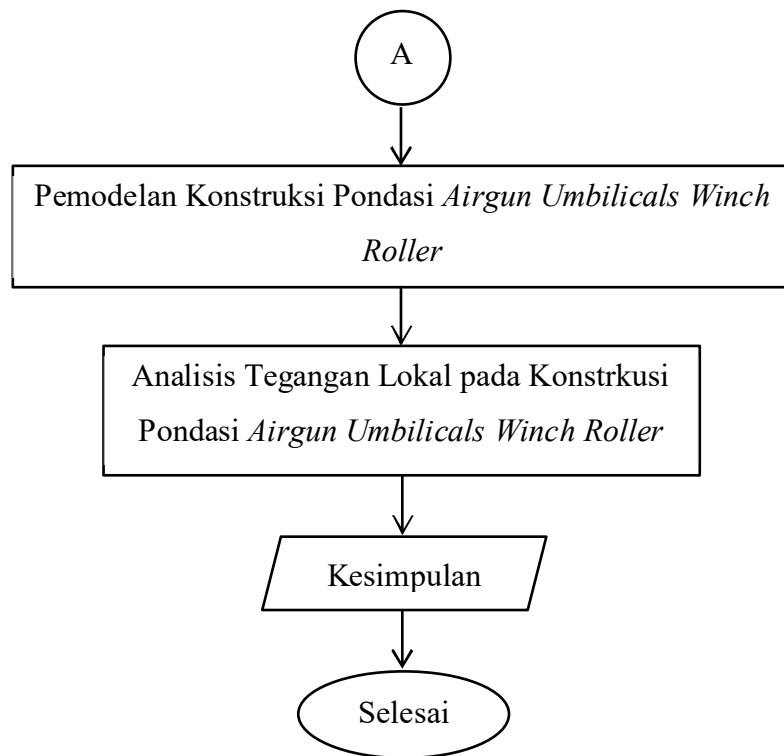
### METODOLOGI

#### 3.1. Alur Pengerjaan

Secara umum pengerjaan Tugas Akhir ini dapat dijelaskan melalui diagram alir sebagai berikut.



**Gambar 3.1.** Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir



**Gambar 3.1.** Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir (lanjutan)

Secara singkat, diagram alir pengerjaan Tugas Akhir dapat dijelaskan sebagai berikut;

#### 1. Studi Literatur dan Pengumpulan Data

Studi literatur bertujuan untuk mengumpulkan referensi dan literatur terkait ilmu yang diterapkan dan didiskusikan dalam pengerjaan Tugas Akhir ini, sekaligus menjadi penunjang dan dasar dalam pengerjaan Tugas Akhir. Referensi dan literatur yang dimaksud dapat berasal dari buku, materi perkuliahan, jurnal dan *proceedings*, penelitian yang telah dilakukan terdahulu, dan sumber di internet.

Pengumpulan data dilakukan untuk menunjang pengerjaan Tugas Akhir yang merupakan studi kasus nyata. Secara garis besar, data yang diperlukan adalah *General Arrangements* dan *Key Plan* Geomarin IV dari PT. Citra Mas, termasuk detail teknis perancangannya, serta data lingkungan perairan laut di Indonesia yang paling ganas, namun masih memungkinkan kegiatan survei seismik untuk dilakukan. Detail dari data-data tersebut akan ditunjukkan pada bagian selanjutnya.

## 2. Pemodelan Numerik Kapal Survei Geomarin IV

Kapal survei Geomarin IV dimodelkan terlebih dahulu berdasarkan ukuran utama kapal dengan bantuan *software* yang keluarannya berupa *lines plan* dan karakteristik hidrostatik. Model numerik yang telah dibuat divalidasi terhadap kapal yang sesungguhnya, dengan kesalahan yang sangat kecil. Hal ini dilakukan untuk memodelkan kapal seakurat mungkin sesuai kapal yang sesungguhnya, sehingga karakteristik gerakan model numerik akan dapat mewakili karakteristik gerakan sesungguhnya. Validasi yang dilakukan meliputi parameter-parameter seperti *displacement*, LCF, LCB, WPA, dsb.

## 3. Analisis Gerakan Kapal Survei Geomarin IV

Model numerik Geomarin IV yang telah dibuat kemudian dianalisis gerakannya pada kondisi terapung di gelombang reguler untuk mendapatkan RAO (*Response Amplitude Operator*) pada enam derajat kebebasan kapal. Hal ini untuk menunjukkan karakteristik gerakan Geomarin IV di gelombang reguler.

## 4. Pemodelan *Airgun* dan *Umbilicals*-nya

*Airgun* dan *umbilicals*-nya dimodelkan secara numerik pada kondisi sedang dibentangkan di permukaan air. *Airgun umbilicals* dimodelkan ketika terbentang sepenuhnya bersama *floaternya*.

## 5. Analisis Gerakan Kapal Survei Geomarin IV Kondisi Operasi Survei

Tahap ini dilakukan analisis gerakan Geomarin IV dengan konfigurasi *airgun umbilicals* terbentang dan ditarik dengan kecepatan tertentu. Tentu gerakan yang terjadi akan berbeda karena terjadi kopel dua *body*, yaitu antara Geomarin IV dan *airguns*.

## 6. Analisis Gaya Tarik *Airgun Umbilicals*

Pada saat Geomarin IV melakukan kegiatan survei seismik, tentu akan terjadi gaya tarik pada *airgun umbilicals*. Hal tersebut dianalisis pada tahap ini. Analisis dilakukan untuk rentang waktu tiga jam atau 10800 detik. Gaya tarik maksimum pada *airgun umbilicals* inilah yang

digunakan sebagai beban untuk analisis konstruksi pondasi *airgun umbilicals winch roller*.

#### 7. Pemodelan Konstuksi Pondasi *Airgun Umbilicals Winch Roller*

Pondasi *Airgun umbilicals winch roller* dimodelkan secara numerik tiga dimensi menggunakan bantuan *software* untuk *modeling*. Model dibuat menyesuaikan material yang digunakan sesungguhnya, seperti massa jenis, modulus elastisitas, dsb.

#### 8. Analisis Tegangan Lokal Pondasi *Airgun Umbilicals Winch Roller*

Beban gaya tarik yang didapatkan sebelumnya dibebankan pada model numerik dari pondasi *airgun umbilicals winch roller*. Pada tahap ini ditentukan pula syarat-syarat batas dan kondisi tumpuan yang sesuai. Dengan bantuan *finite element analysis software*, struktur dibagi-bagi menjadi elemen (*mesh*) untuk selanjutnya dilakukan analisis tegangan lokal.

### 3.2. Data yang Terkumpul

#### 3.2.1. Data Utama Kapal Survei Geomarin IV

Berikut ini adalah data utama kapal survei Geomarin yang diperoleh dari PT. Citra Mas.

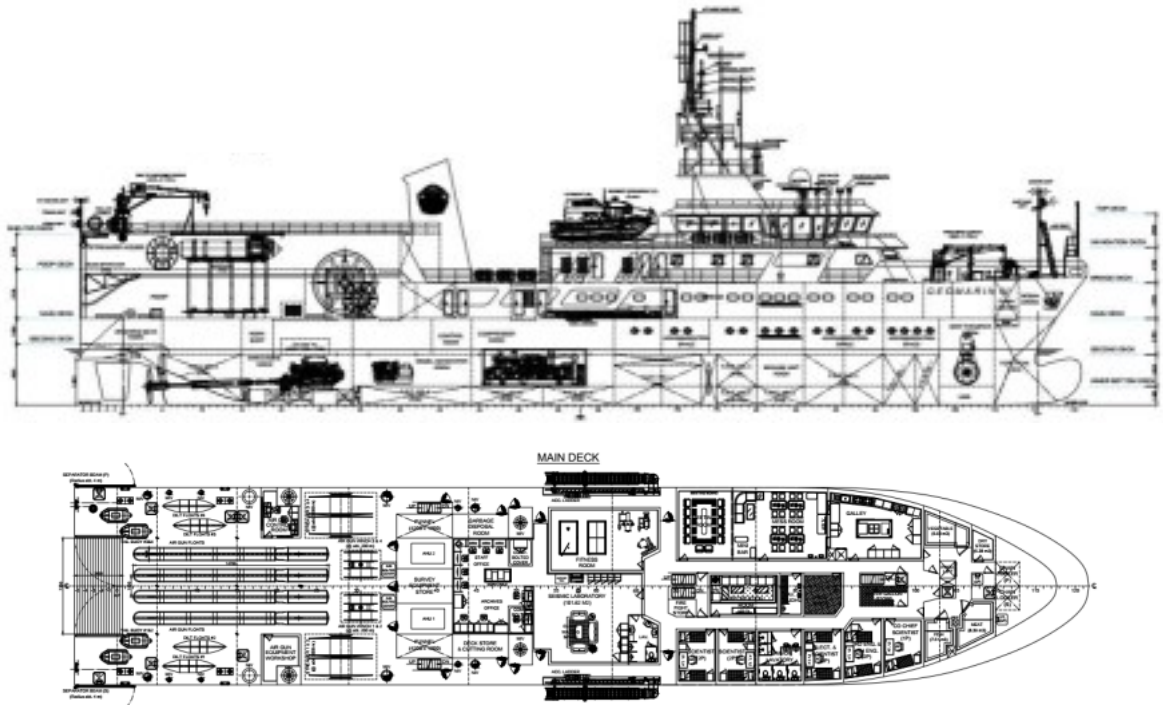
**Tabel 3.1.** Data Utama Geomarin IV  
(sumber: PT. Citra Mas, 2017)

Deskripsi	Simbol	Nilai	
<i>Length Overall</i>	(LOA)	76.20	m
<i>Length Between Perpendicular</i>	(LPP)	69.31	m
<i>Moulded Breadth</i>	(B)	14.80	m
<i>Moulded Depth</i>	(H)	6.50	m
<i>Design Draft</i>	(T)	4.20	m
<i>Service Speed</i>	(V <sub>s</sub> )	12.50	knot
<i>Towing Speed</i>		5.00	knot
<i>Scientist and Technician</i>		26	orang
<i>Crew</i>		24	orang



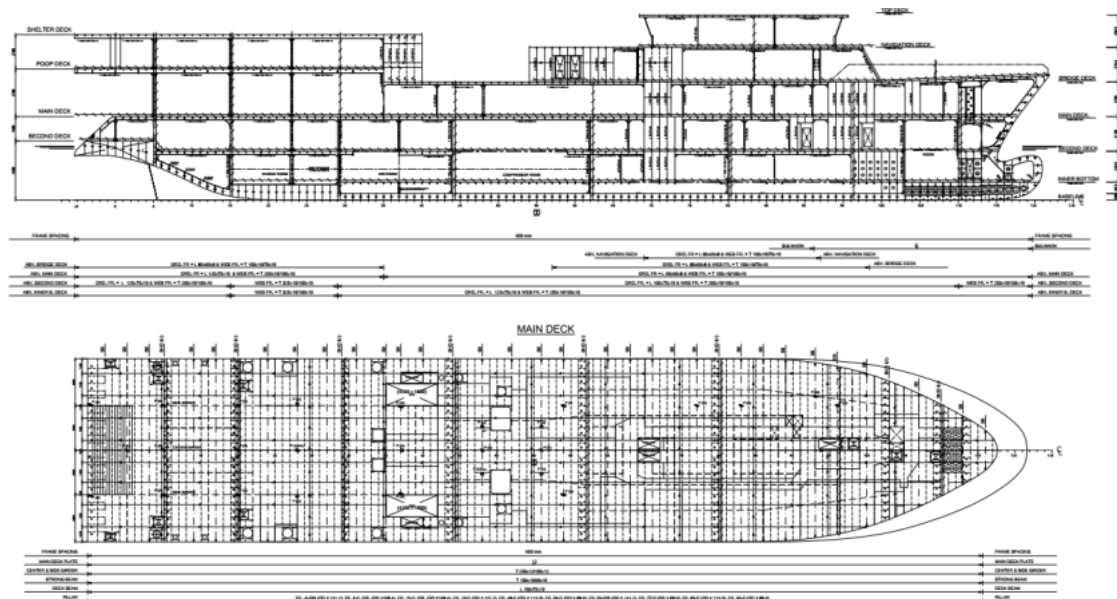
### 3.2.2. General Arrangements dan Key Plan Geomarin IV

Berikut adalah gambar umum *General Arrangements* dan *Key Plan* Geomarin IV.



**Gambar 3.2.** *General Arrangements* Geomarin IV

(sumber: PT. Citra Mas, 2017)

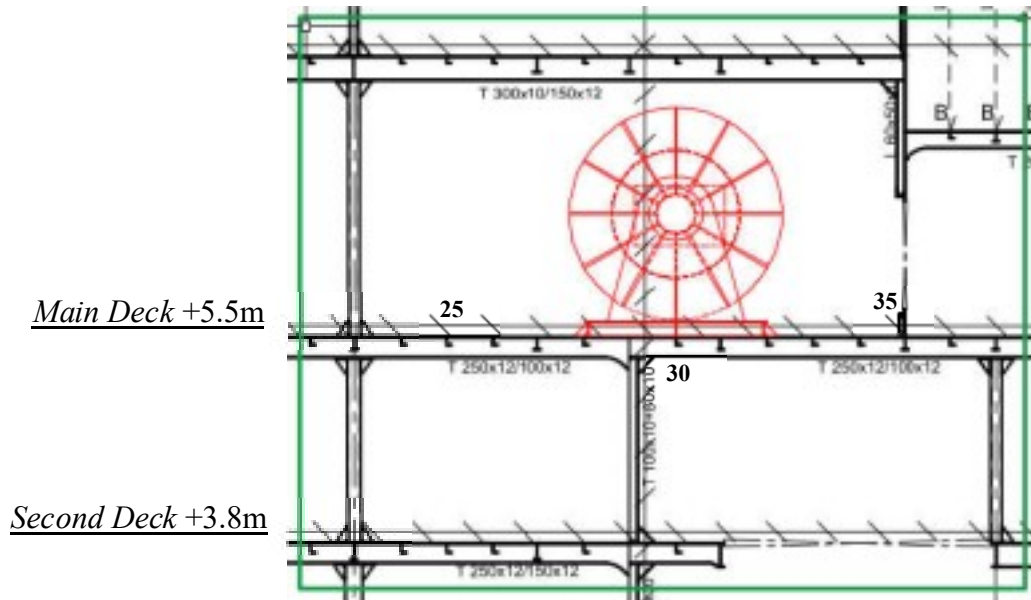


**Gambar 3.3.** *Key Plan* Geomarin IV

(sumber: PT. Citra Mas, 2017)

### 3.2.3. General Arrangement Konstruksi Airgun Umbilicals Winch Roller

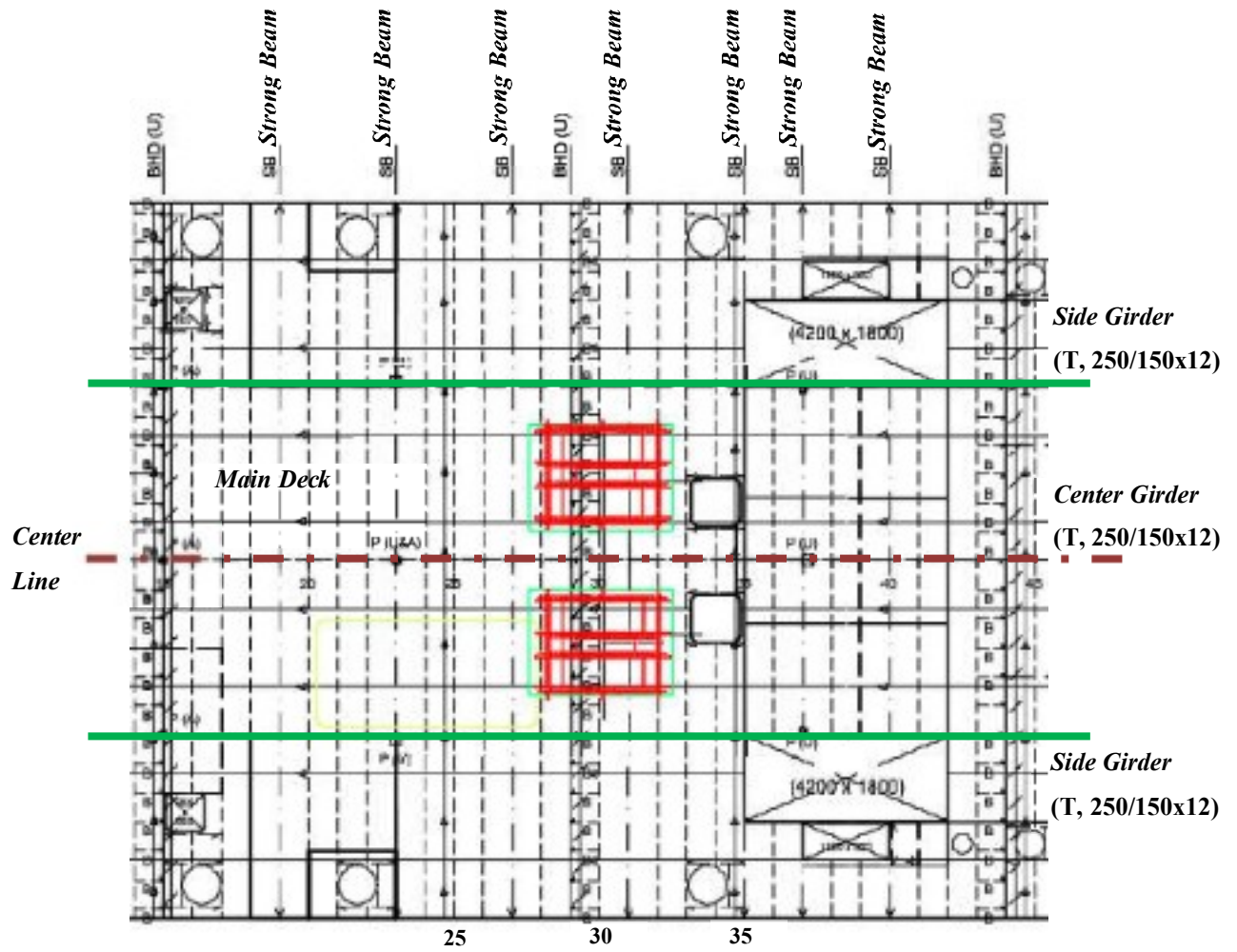
Berikut ini adalah gambar yang menunjukkan peletakkan pondasi *airgun umbilicals winch roller* pada dek Geomarin IV.



Gambar 3.4. Pondasi Airgun Umbilicals Winch Roller di Main Deck

(sumber: PT. Citra Mas, 2017)

Konstruksi pondasi *winch roller* untuk *airgun umbilicals* berada di atas *main deck* dengan tebal 12 mm, porosnya berada pada *frame* 30, yang secara keseluruhan berada di atas *frame* 28 hingga 32. Jarak antar *frame* adalah 600 mm dengan *deck beam* berpenampang L 125x75x10 mm (*web* 125 mm, *flange* 75 mm, dan tebal 10 mm). Konstruksi ini diapit oleh *side girder* pada jarak 3600 mm dari *center girder* ke arah *port* dan *starboard* (lihat gambar 3.5 di halaman berikutnya). Selain itu, pada *main deck* konstruksi ini didukung oleh *strong beam* (SB) pada *frame* 19, 23, 27, 31, 35, 37, dan 40, dengan penampang T 150/90x10 mm (*web* 150 mm, *flange* 90 mm, dan tebal 10 mm). Terdapat *bulkhead* (BHD) pada *frame* 15, 29, dan 44, dengan tebal 12 mm. Seluruh penjelasan di atas dapat dilihat pada gambar 3.5 di halaman selanjutnya. Detail dari konstruksi pondasi *winch roller* untuk *airgun umbilicals* akan disajikan pada bagian selanjutnya.



**Gambar 3.5.** Konfigurasi *Frame Main Deck* Tempat Konstruksi *Winch Roller*  
(sumber: PT. Citra Mas, 2017)

### 3.2.4. Data Dimensi *Streamer*, *Airgun*, *Floater*, dan *Umbilicals*-nya

Berikut adalah data dimensi peralatan survei seismik yang digunakan pada Geomarin IV.

**Tabel 3.2.** Dimensi *Streamer* per *Section*

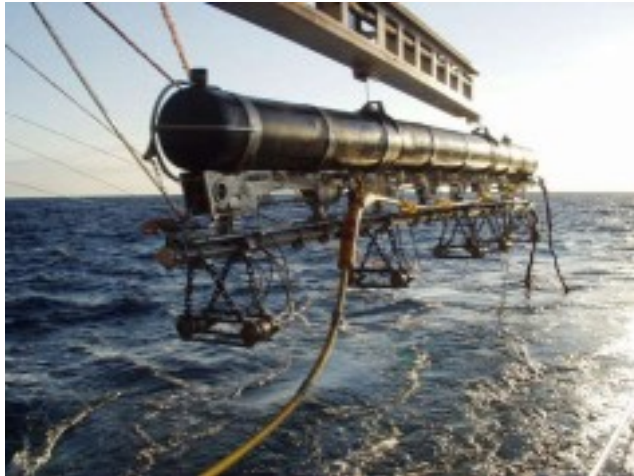
(sumber: PT. Citra Mas, 2017)

<b>ION DigiSTREAMER Cable</b>	
Parameter	Nilai
Panjang	100 m
Diameter	53 mm
Berat di Udara	243.1 kg
Material	Polyurethane

**Tabel 3.3.** Dimensi *Umbilical* per *Section*

(sumber: PT. Citra Mas, 2017)

<b>Sercel Umbilical Sentinel RD</b>	
Parameter	Nilai
Panjang	90 m
Diameter	55 mm
Berat di Udara	2.754 kg/m
Material	Polyurethane



**Gambar 3.6.** Sercel *Airguns* dan *Floater*s  
(sumber: Sercel, 2008)

### 3.2.5. Data Lingkungan

Geomarin IV direncanakan untuk beroperasi dan melakukan survei di seluruh wilayah perairan Indonesia. Dalam Tugas Akhir ini dipilih kondisi lingkungan yang paling ganas, yaitu yang berada pada *sea state* 6 skala Beaufort, namun masih memungkinkan kegiatan survei seismik untuk tetap dilakukan. Wilayah yang dipilih adalah Laut Arafuru di sekitar Blok Masela dengan kedalaman laut sekitar 588 meter.

**Tabel 3.4.** Data Lingkungan Laut Arafuru (*Ommidirection*)  
(sumber: Inpex Masela Ltd., 2010)

Gelombang 10 Tahunan (JONSWAP)			
Tinggi Signifikan	$(H_s)$	4.20	m
Periode Puncak	$(T_p)$	9.50	s
Angin 10 Tahunan			
Kecepatan	$(U_w)$	15.30	m/s
Durasi		1.00	jam
Arus 10 Tahunan			
Kecepatan di Dasar	$(V_{ub})$	0.46	m/s
Kecepatan di Permukaan	$(V_{us})$	1.28	m/s

## BAB IV

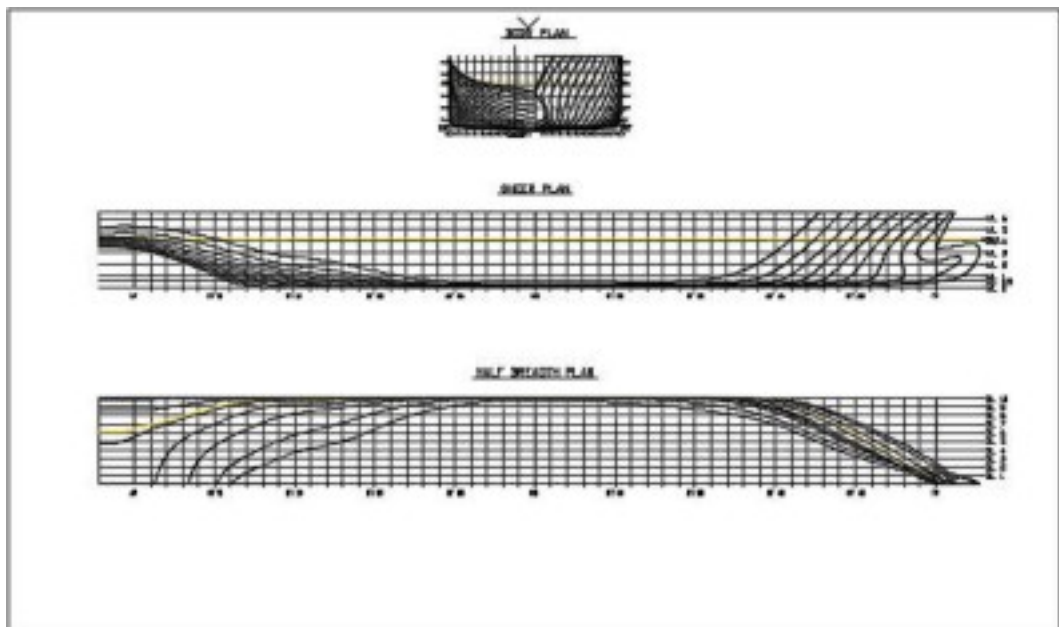
### ANALISIS HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1. Pemodelan Numerik Kapal Survei Seismik Geomarin IV

Pemodelan numerik kapal survei seismik Geomarin IV dilakukan dengan bantuan *software* Maxsurf berdasarkan data dimensi utama kapal yang telah diberikan pada Tabel 4.1. dan *General Arrangements*-nya. Dari pemodelan yang dilakukan dengan *software* Maxsurf didapatkan *lines plan* berikut ini.

**Tabel 4.1.** Dimensi Utama Geomarin IV  
(sumber: PT. Citra Mas, 2017)

Parameter	Simbol	Nilai	
<i>Length Overall</i>	LOA	76.2	m
<i>Length Between Perpendicular</i>	LPP	69.31	m
<i>Moulded Breadth</i>	B	14.8	m
<i>Moulded Depth</i>	H	6.5	m
<i>Design Draft</i>	T	4.2	m



**Gambar 4.1.** *Lines Plan* Pemodelan Kapal Survei Seismik Geomarin IV

Model yang telah dibuat ini dihitung hidrostatisnya untuk selanjutnya divalidasi menyesuaikan data hidrostatik sesungguhnya kapal Geomarin IV.

Hal ini dilakukan agar model numerik yang telah dibuat memiliki karakteristik hidrostatik yang sama dengan kapal sesungguhnya. Parameter-parameter hidrostatik ini nantinya akan digunakan dalam persamaan-persamaan gerak kapal, sehingga diharapkan model numerik yang dibuat dapat mewakili gerakan kapal sesungguhnya. Validasi model numerik berdasarkan hidrostatiknya dapat dilihat pada tabel berikut ini.

**Tabel 4.2.** Validasi Model Numerik dengan Data Hidrostatik

Parameter	Simbol	Satuan	Asli	Model	Error
Sarat Air ( <i>Draft</i> )	T	m	4.2	4.2	0.000%
<i>Displacement</i>	$\Delta$	ton	3161	3161	0.000%
<i>Volume Displaced</i>	$\nabla$	m <sup>3</sup>	3083.902	3084.168	0.009%
<i>Length of Waterline</i>	LWL	m	72.513	72.699	0.257%
<i>Wetted Surface Area</i>	WSA	m <sup>2</sup>	1318.613	1319.586	0.074%
<i>Water Plane Area</i>	$A_{wp}$	m <sup>2</sup>	929.957	930.291	0.036%
Koefisien Prismatic	$C_p$		0.718	0.716	0.279%
Koefisien Blok	$C_B$		0.684	0.682	0.292%
Koefisien <i>Midship</i>	$C_M$		0.954	0.952	0.210%
Koefisien Bidang Garis Air	$C_{wp}$		0.867	0.865	0.231%
<i>Longitudinal Center of Buoyancy</i>	$LCB_{AP}$	m	34.579	34.831	0.729%
<i>Longitudinal Center of Floatation</i>	$LCF_{AP}$	m	31.137	31.413	0.886%
<i>Center of Buoyancy above Keel</i>	KB	m	2.330	2.341	0.472%
<i>Transversal Metacentric Radius</i>	$BM_T$	m	4.786	4.827	0.857%
<i>Longitudinal Metacentric Radius</i>	$BM_L$	m	106.092	105.343	0.706%
<i>Transversal Keel to Metacenter</i>	$KM_T$	m	7.115	7.168	0.745%
<i>Longitudinal Keel to Metacenter</i>	$KM_L$	m	108.422	107.684	0.681%
<i>Ton per 1 centimeter Immersion</i>	TPC	ton/cm	9.532	9.535	0.031%
<i>Moment to Trim 1 centimeter</i>	MTC	ton-m	47.526	48.047	1.096%

Model numerik yang dibuat adalah untuk kondisi sarat 4.2 m, yaitu ketika kondisi muatan kapal sedang penuh dan akan memulai operasinya. Perhatikan dari tabel di atas bahwa seluruh *error* di bawah 2% sehingga model numerik yang telah dibuat dapat dikatakan sudah cukup mewakili kapal yang sesungguhnya, sehingga dapat digunakan untuk analisis gerakan kapal.



#### 4.2. Analisis Gerakan Kapal Survei Seismik Geomarin IV

Analisis ini dilakukan untuk menentukan *response amplitude operator* (RAO) pada setiap derajat kebebasan kapal pada kondisi diam (*free floating*) dan pada kondisi kapal sedang melaju dengan kecepatan operasi survei 5 knot. Analisis ini dibantu dengan menggunakan *software* yang telah tersedia berdasarkan model numerik yang telah dibuat sebelumnya. Seperti yang telah dijelaskan pada dasar teori bahwa RAO yang dihitung adalah RAO pada titik acuan yang umumnya pada titik berat kapal (CG/*Center of Gravity*). Titik berat kapal Geomarin IV untuk kondisi muatan penuh disajikan pada tabel berikut.

**Tabel 4.3.** Titik Berat (CG) Kapal Geomarin IV  
(sumber: PT. Citra Mas, 2017)

Kondisi Muatan Penuh		
(LCG)	CG dari AP (m)	34.878
(TCG)	CG dari CL (m)	0.015
(VCG/KG)	CG dari <i>Keel</i> (m)	4.632

Perlu diperhatikan pula bahwa dalam analisis gerakan kapal dibutuhkan parameter jari-jari girasi untuk digunakan pada komponen momen inersia massa pada persamaan geraknya. Parameter jari-jari girasi secara umum dapat dihitung berdasarkan distribusi massa dan letaknya terhadap sumbu netral (sumbu yang melewati titik berat kapal), namun karena bentuk kapal yang melengkung dan distribusi massa yang rumit maka perhitungan jari-jari girasi dapat disederhanakan menggunakan pendekatan oleh Bureau Veritas yang telah digunakan secara umum sebagai berikut ((Journee & Massie, 2001) dan (Bhattacharyya, 1978)),

**Tabel 4.4.** Pendekatan Jari-jari Girasi oleh Bureau Veritas  
(sumber: *Offshore Hydromechanics*, Journee, 2001)

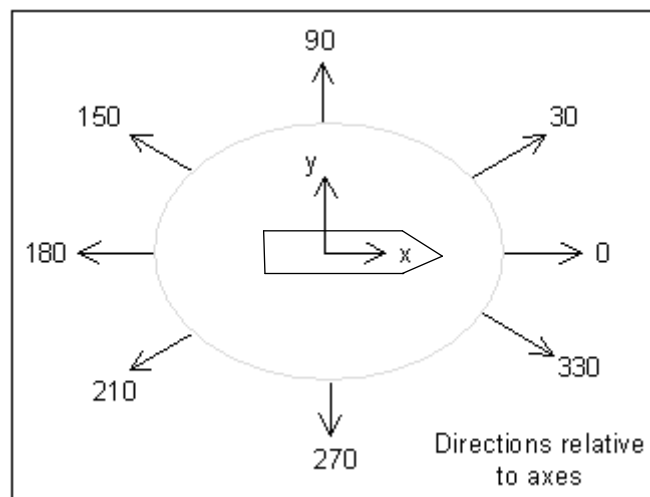
Jari-jari Girasi <i>Roll</i>	Jari-jari Girasi <i>Pitch</i> dan <i>Yaw</i>
$k_{xx} \approx 0.29 \times B \times \left( 1 + \left( \frac{2KG}{B} \right)^2 \right)$	$k_{yy} \approx k_{zz} \approx LWL \times \sqrt{\frac{1}{12}}$

di mana  $B$  adalah lebar kapal,  $KG$  adalah jarak titik berat dari *keel*, dan  $LWL$  adalah panjang garis air pada sarat tertentu.

**Tabel 4.5.** Perhitungan Jari-jari Girasi

Muatan Penuh	Jari-jari Girasi <i>Roll</i>	$k_{xx}$	5.974	m
	Jari-jari Girasi <i>Pitch</i>	$k_{yy}$	20.933	m
	Jari-jari Girasi <i>Yaw</i>	$k_{zz}$	20.933	m

Analisis gerakan kapal dilakukan ketika arah datang gelombang *head seas* ( $180^\circ$  relatif sumbu  $x$  kapal), *quartering seas* ( $45^\circ$  relatif sumbu  $x$  kapal), *beam seas* ( $90^\circ$  relatif sumbu  $x$  kapal), dan *following seas* ( $0^\circ$  relatif sumbu  $x$  kapal), lebih jelasnya dapat dilihat pada ilustrasi di bawah ini,



**Gambar 4.2.** Konvensi Arah Datang Gelombang

(sumber: Orcina OrcaFlex *User Help*)

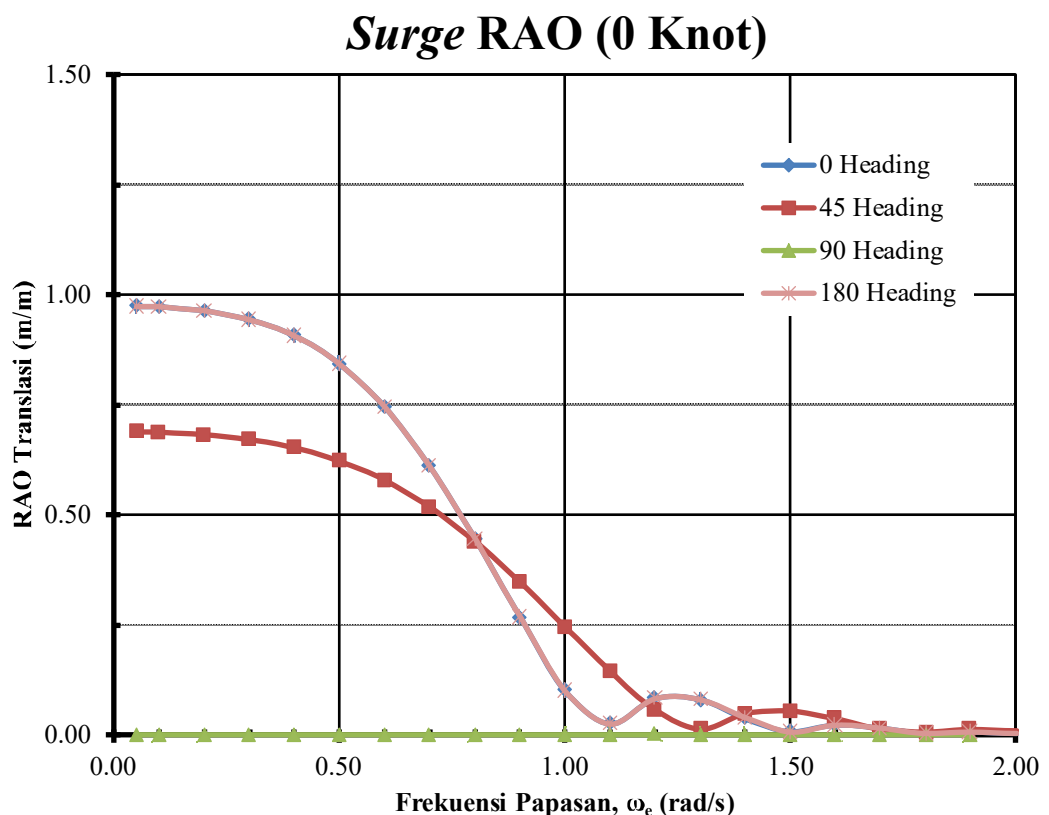
RAO dihitung untuk gelombang dengan frekuensi ( $\omega$ ) di antara 0.05 rad/s hingga 2.00 rad/s. Apabila kapal dalam keadaan terapung bebas (tidak sedang melaju, kecepatan 0 knot), maka frekuensi yang digunakan adalah frekuensi gelombang itu sendiri, apabila kapal dalam keadaan sedan melaju dengan kecepatan 5 knot, maka frekuensi yang digunakan adalah frekuensi gelombang papasan (*encountering frequency*,  $\omega_e$ ) yang merupakan fungsi dari kelajuan kapal dan arah datang gelombang relatif terhadap arah laju kapal.



#### 4.2.1. Analisis Gerakan Kapal Kondisi Terapung Bebas (0 Knot)

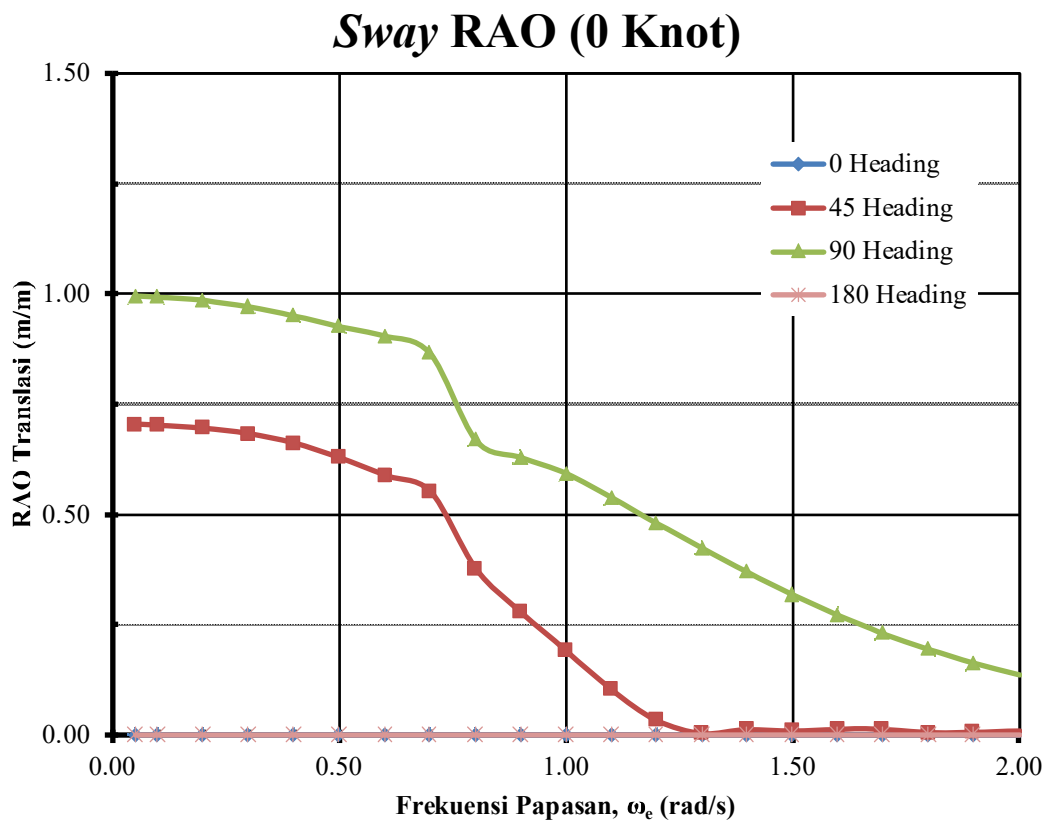
Analisis gerakan kapal kondisi terapung bebas memang tidak ada hubungan langsung dengan analisis untuk menentukan gaya tarik *umbilicals*, namun analisis ini sangat penting sebagai pembandingan analisis gerakan pada saat kapal melaju. Hasil yang didapat digunakan untuk mengetahui apakah kalkulasi yang dilakukan sudah benar atau tidak (sesuai dengan hipotesis sederhana). Berikut ini adalah ulasan sederhana terkait gerakan kapal survei seismik Geomarin IV kondisi muatan penuh dan terapung bebas untuk arah datang yang telah ditetapkan sebelumnya.

Dapat diperhatikan dari gambar 4.3 di bawah ini, bahwa *surge* akan dominan pada arah datang gelombang  $0^\circ$  dan  $180^\circ$  dengan nilai RAO mendekati 0.974 m/m, sementara arah datang  $90^\circ$  tidak terjadi sama sekali. Hal ini sesuai dengan hipotesis dan logika sederhana bahwa kapal yang terhempas gelombang dari arah depan maupun belakang akan mengalami gerakan maju dan mundur lebih besar di banding dari arah lain.



Gambar 4.3. RAO Gerakan *Surge* Kondisi Terapung Bebas

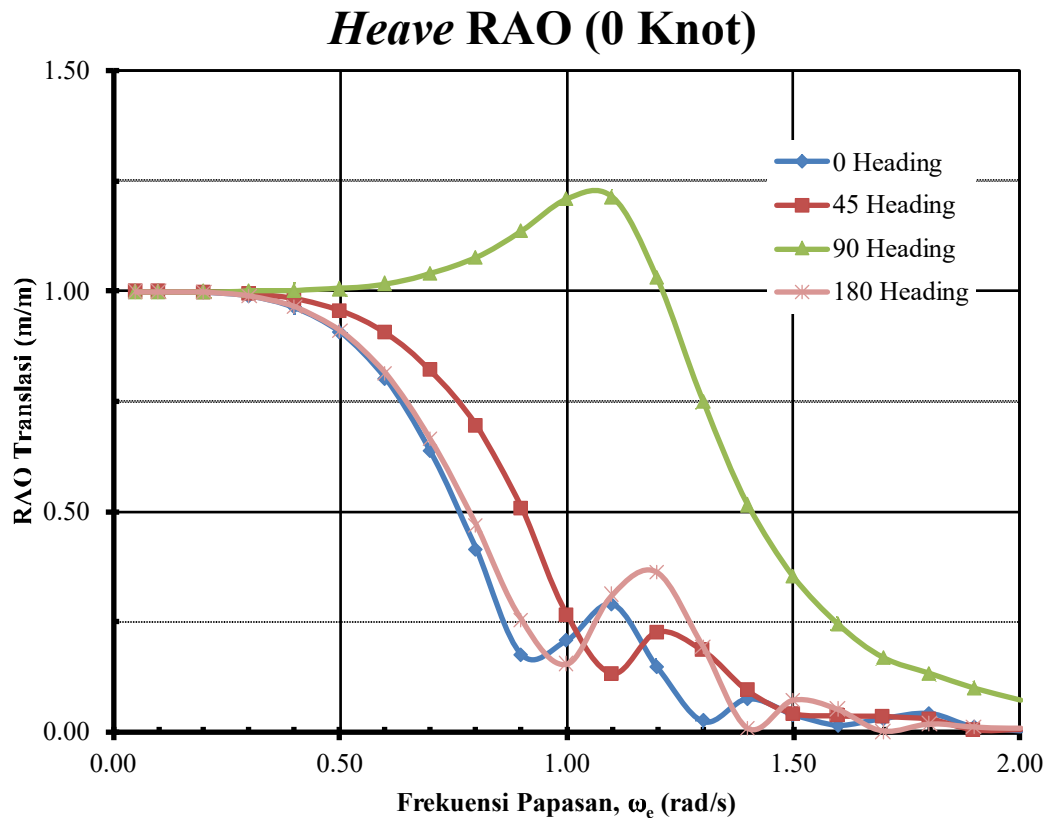
Perhatikan gambar 4.4 berikut gerakan *sway* akan dominan pada arah datang  $90^0$  dan  $45^0$  dengan RAO 0.995 m/m dan 0.704 m/m, sementara arah datang  $0^0$  dan  $180^0$  tidak terjadi *sway* sama sekali. Hal ini sesuai dengan hipotesis dan logika sederhana bahwa kapal yang terhempas gelombang dari arah samping akan mengalami *sway* lebih dominan dibanding dari arah yang lainnya. Perhatikan bahwa tren kurva RAO gerakan *sway* akan cenderung menurun seiring bertambahnya frekuensi (periode gelombang semakin pendek), hal ini menunjukkan efek *platforming* ketika frekuensi gelombang yang tinggi sehingga menyebabkan kesan seakan akan bangunan apung merespon dengan respon yang kecil.



**Gambar 4.4.** RAO Gerakan *Sway* Kondisi Terapung Bebas

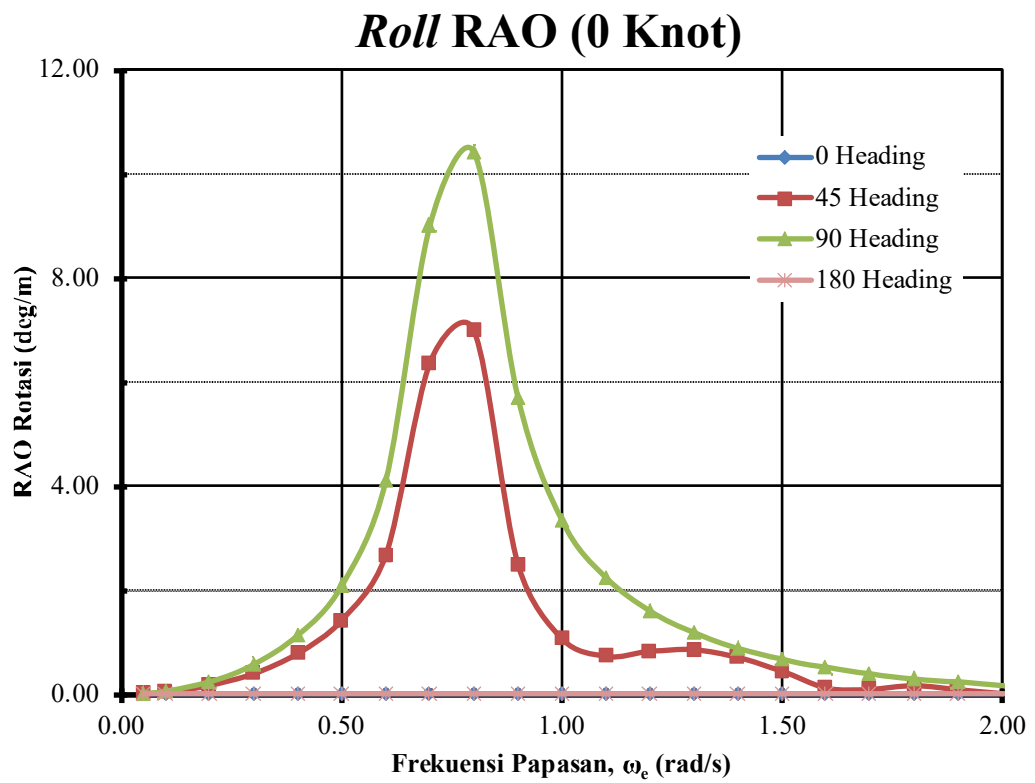
Gambar 4.5 pada halaman selanjutnya menunjukkan kurva RAO untuk gerakan *heave*. Dapat diperhatikan bahwa gerakan *heave* akan dominan saat arah datang gelombang  $90^0$  dengan nilai maksimum 1.214 m/m pada

frekuensi gelombang 1.1 rad/s. Hal tersebut menunjukkan bahwa kapal akan mengalami resonansi *heave* pada gelombang berfrekuensi 1.1 rad/s. Oleh karena itu, saat beroperasi perlu diwaspadai gelombang *beam sea* dengan frekuensi di antara 0.5 hingga 1.2 rad/s.

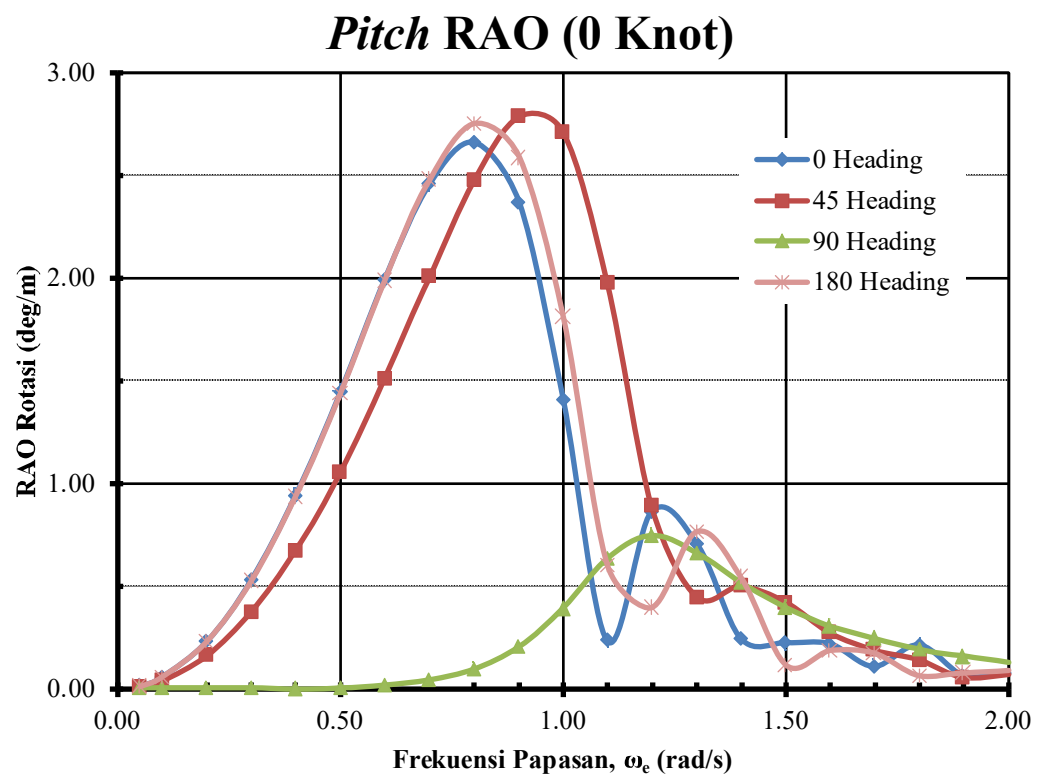


**Gambar 4.5.** RAO Gerakan *Heave* Kondisi Terapung Bebas

Kurva-kurva RAO gerakan *roll* disajikan pada gambar 4.6 di halaman selanjutnya. Dari gambar tersebut dapat diketahui bahwa *roll* akan dominan terjadi saat arah datang gelombang  $90^0$  dan  $45^0$  dengan nilai RAO maksimum 10.423 deg/m dan 6.996 deg/m berurutan pada frekuensi gelombang yang sama yaitu 0.8 rad/s. Hal ini menunjukkan bahwa kapal akan mengalami resonansi yang signifikan sekali pada *beam sea* dan *quartering sea* saat gelombang berfrekuensi 0.8 rad/s. Selain itu dapat diketahui hal penting lain, bahwa gelombang *beam sea* ( $90^0$ ) dan *quartering sea* ( $45^0$ ) dengan frekuensi antara 0.6 hingga 0.9 rad/s perlu diwaspadai dan sebisa mungkin dihindari selama beroperasi.

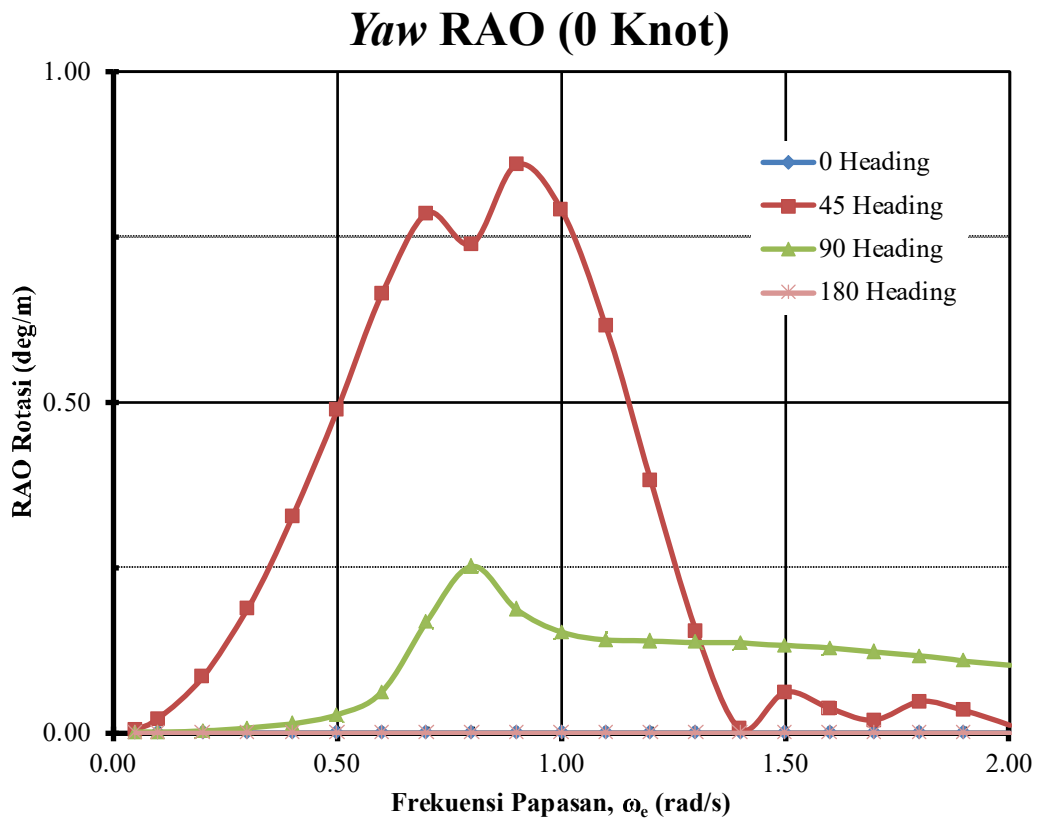


Gambar 4.6. RAO Gerakan *Roll* Kondisi Terapung Bebas



Gambar 4.7. RAO Gerakan *Pitch* Kondisi Terapung Bebas

Gambar 4.7 pada halaman sebelumnya menunjukkan kurva-kurva RAO untuk gerakan *pitch*, yaitu gerakan rotasional terhadap sumbu  $y$  kapal. Dari gambar tersebut dapat diperhatikan bahwa gerakan *pitch* akan terjadi saat gelombang datang dari arah manapun, namun yang paling dominan adalah saat arah datang gelombang  $0^\circ$ ,  $180^\circ$ , dan  $45^\circ$ , sementara arah datang gelombang  $90^\circ$  menyebabkan gerakan *pitch* yang tidak begitu dominan. Hal ini sesuai dengan logika dan hipotesis sederhana bahwa kapal yang terhempas gelombang dari arah depan (arah sumbu  $x$ ) akan menyebabkan kapal berotasi pada sumbu  $y$ .



**Gambar 4.8.** RAO Gerakan *Pitch* Kondisi Terapung Bebas

Perhatikan gambar 4.8 di atas. Gambar tersebut menunjukkan kurva-kurva RAO gerakan *yaw*, yaitu gerakan rotasional terhadap sumbu  $z$ . Dari kurva tersebut didapati bahwa gerakan *yaw* dominan sekali terjadi saat arah datang gelombang menyerong atau  $45^\circ$ , dengan nilai RAO maksimum sebesar 0.859 deg/m pada frekuensi gelombang 0.9 rad/s. Arah datang

gelombang  $90^0$  menyebabkan gerakan *yaw* yang tidak begitu signifikan, sementara arah datang gelombang  $0^0$  dan  $180^0$  sama sekali tidak menyebabkan gerakan *yaw*. Secara logika, seharusnya arah datang gelombang dari sumbu mana saja dapat menyebabkan rotasi pada sumbu *z*, namun perlu diingat bahwa objek yang ditinjau adalah sebuah kapal yang simetris terhadap sumbu *y*, sehingga arah datang gelombang pada sumbu *x* sama sekali tidak menyebabkan kapal berotasi terhadap sumbu *y*.

Dari ulasan di atas dapat disimpulkan beberapa hal terkait RAO pada setiap derajat kebebasan dan arah datang gelombang, hal tersebut disajikan pada tabel berikut ini.

**Tabel 4.6.** Ringkasan RAO Maksimum Kondisi Terapung Bebas

Gerakan	Satuan	RAO Maksimum (0 Knot)			
		$0^0$	$45^0$	$90^0$	$180^0$
<i>Surge</i>	m/m	0.974	0.689	0.002	0.974
<i>Sway</i>	m/m	0.000	0.704	0.995	0.000
<i>Heave</i>	m/m	0.999	0.999	1.214	0.999
<i>Roll</i>	deg/m	0.004	6.996	10.423	0.005
<i>Pitch</i>	deg/m	2.660	2.786	0.748	2.752
<i>Yaw</i>	deg/m	0.000	0.859	0.252	0.000

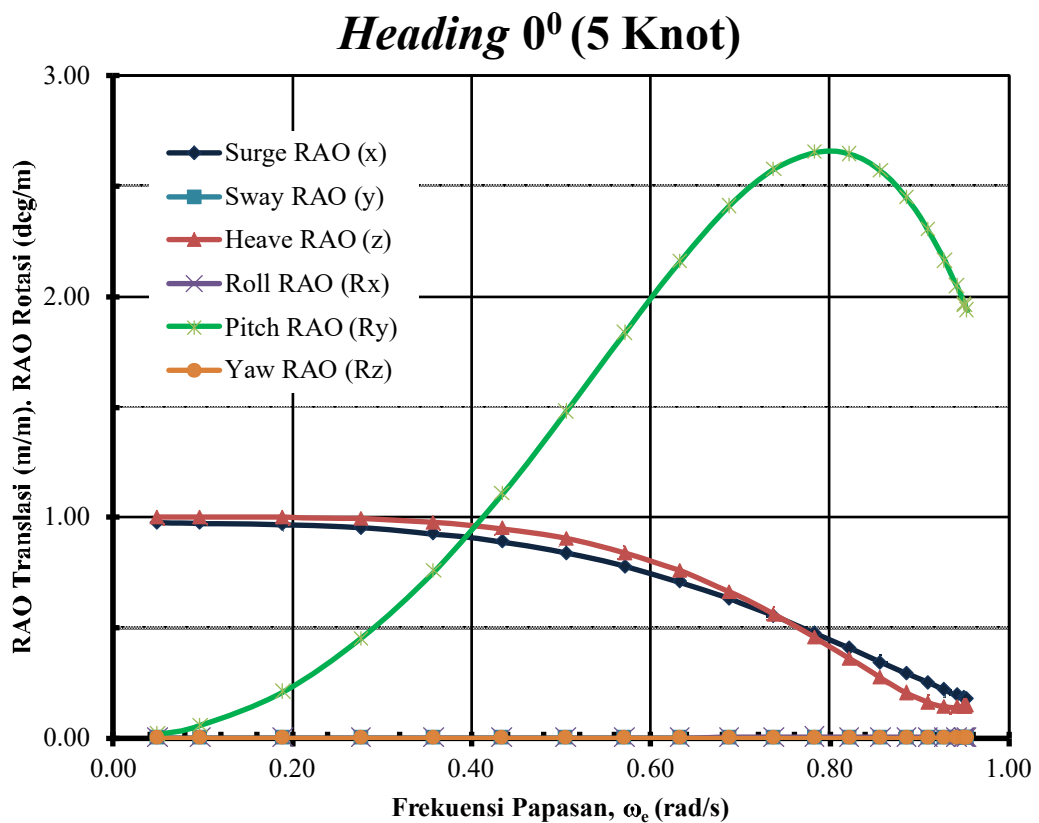
Tabel di atas menunjukkan bahwa kalkulasi RAO kapal model numerik Geomarin IV yang dilakukan dapat dikatakan benar karena sudah sesuai dengan logika dan hipotesis-hipotesis sederhana, bahwa saat arah datang gelombang  $0^0$  dan  $180^0$  nilai RAO gerakan *surge*, *heave*, dan *pitch* lebih besar daripada nilai RAO gerakan *sway*, *roll*, dan *yaw*. Sementara saat arah datang gelombang  $90^0$  nilai RAO gerakan *sway*, *heave*, dan *roll* lebih besar daripada nilai RAO gerakan *surge*, *pitch*, dan *yaw*.

#### 4.2.2. Analisis Gerakan Kapal Kondisi Melaju (5 Knot)

Analisis gerakan kapal pada saat sedang melaju pada kecepatan tarik 5 knot sangat penting untuk digunakan pada analisis gaya tarik *umbilicals* karena operasi survei (operasi saat *streamer* dan *airguns* dibentangkan dan

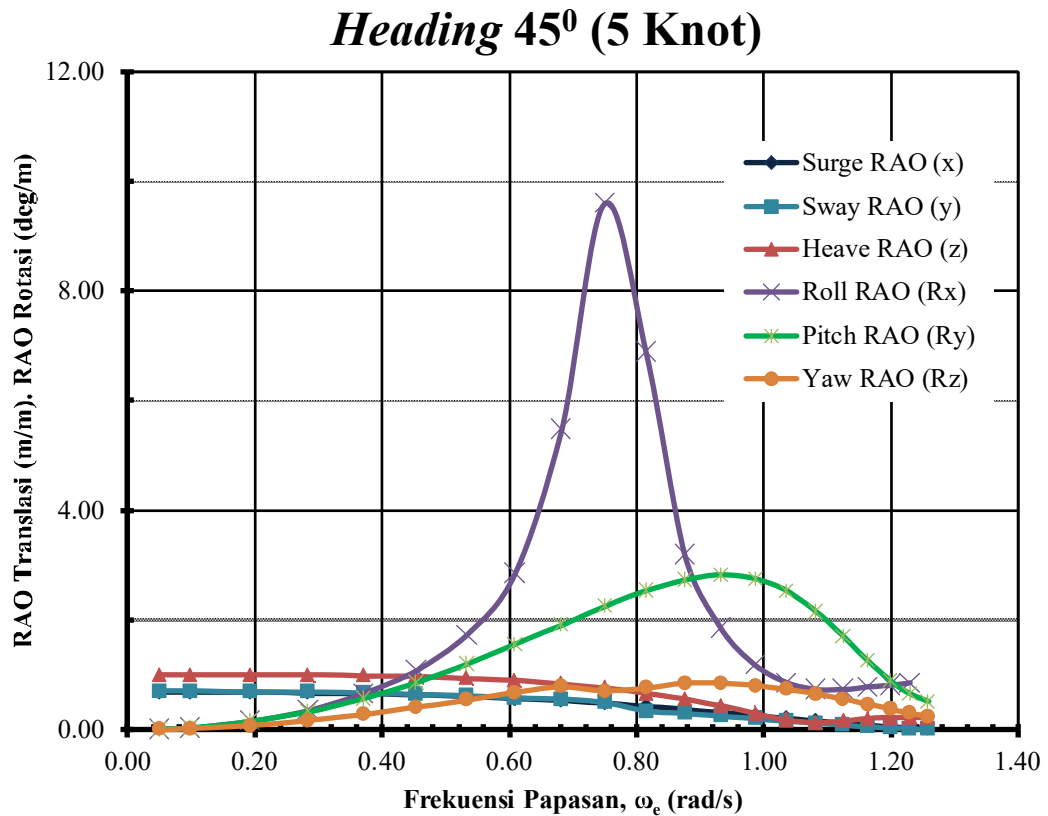
ditarik) dilakukan pada kecepatan 5 knot. Pada tahap ini RAO dihitung berdasarkan frekuensi gelombang papasannya ( $\omega_e$ ) karena kapal sedang melaju dengan kecepatan tertentu, dengan tetap menggunakan frekuensi gelombang datang 0.05 rad/s hingga 2.00 rad/s.

Perhatikan gambar 4.9 berikut ini. Gambar tersebut menunjukkan kurva-kurva RAO saat arah datang gelombang  $0^0$  dan kapal melaju dengan kecepatan 5 knot. Perhatikan bahwa frekuensi gelombang papasan akan bernilai lebih kecil daripada frekuensi gelombang yang sebenarnya. Hal ini terjadi karena kapal dan gelombang bergerak pada arah yang sama sehingga seolah-olah gelombang lebih lama mendekati kapal. Gerakan *surge*, *heave*, dan *pitch* mendominasi sementara *sway*, *roll*, dan *yaw* tidak terjadi sama sekali, hal ini sesuai logika dan hipotesis sederhana bahwa apabila kapal dihempas dari arah depan atau belakang maka kapal akan cenderung bergerak maju dan mundur (searah sumbu  $x$ ), dan mengalami rotasi terhadap sumbu  $y$ .



**Gambar 4.9.** RAO saat Arah Datang  $0^0$  dan Kondisi Melaju 5 Knot

Selanjutnya pada gambar 4.10 berikut, disajikan kurva-kurva RAO saat arah datang gelombang  $45^\circ$  dan kapal sedang melaju dengan kecepatan 5 knot.

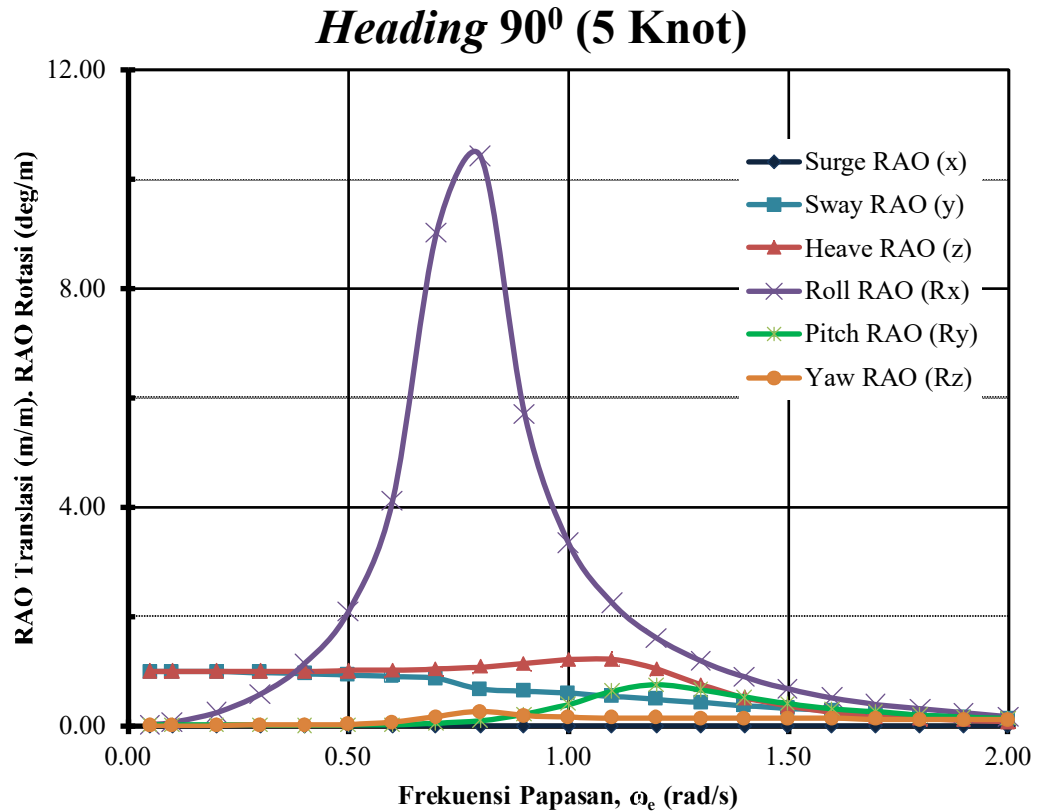


Gambar 4.10. RAO saat Arah Datang  $45^\circ$  dan Kondisi Melaju 5 Knot

Dapat diperhatikan bahwa frekuensi gelombang papasan akan bernilai lebih kecil daripada frekuensi gelombang yang sebenarnya, hal ini sama halnya dengan penjelasan pada saat arah datang gelombang  $0^\circ$ . Saat arah datang gelombang  $45^\circ$  dan kapal sedang melaju, gerakan *roll* dan *yaw* akan mendominasi, ditambah gerakan *pitch* (dikarenakan bentuk geometri kapal), sementara gerakan lain tetap terjadi namun tidak signifikan yang disebut terakhir. Hal ini bersesuaian dengan RAO saat kapal terapung bebas di mana gerakan yang mendominasi untuk arah datang gelombang  $45^\circ$  adalah *roll*, *yaw*, dan *pitch*. Perhatikan bahwa gerakan *roll* akan beresonansi pada gelombang papasan dengan frekuensi 0.6 hingga 0.9 rad/s.



Gambar 4.11 di bawah ini menunjukkan kurva-kurva RAO saat arah datang gelombang  $90^0$  dan kapal sedang melaju dengan kecepatan 5 knot.



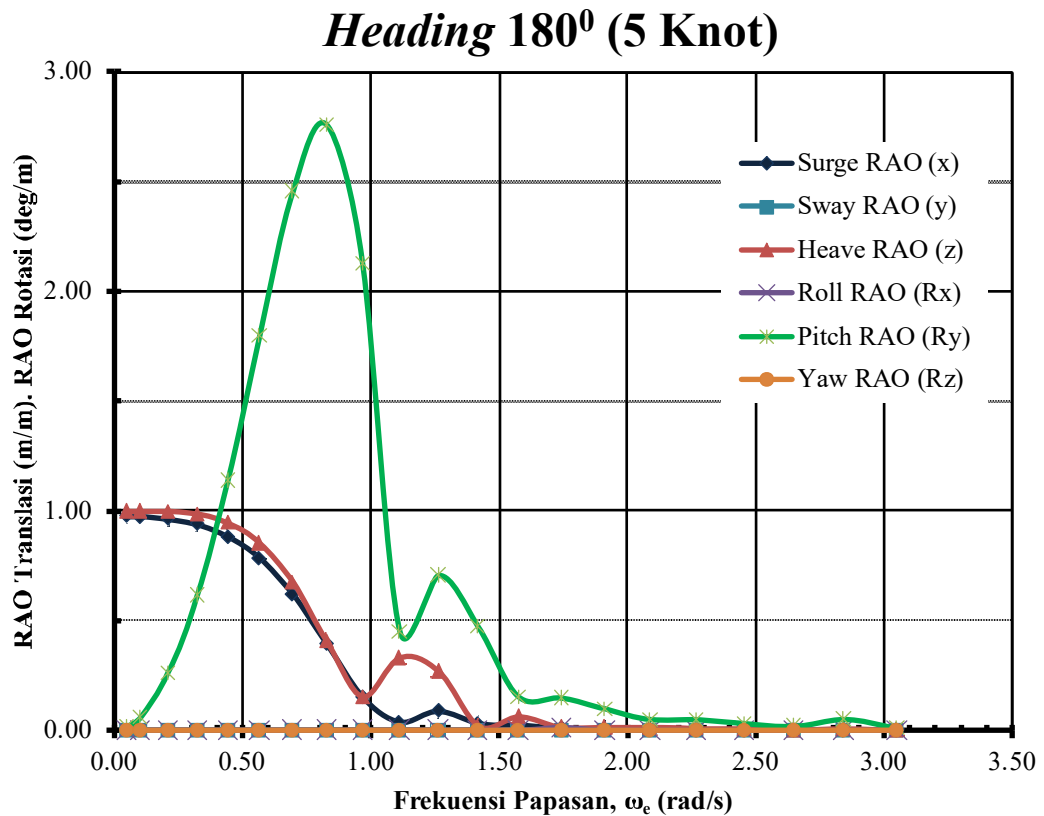
Gambar 4.11. RAO saat Arah Datang  $90^0$  dan Kondisi Melaju 5 Knot

Perhatikan, dari gambar di atas dapat diketahui bahwa gerakan yang mendominasi adalah gerakan *roll*, *heave*, dan *sway*. Hal ini sesuai dengan logika dan hipotesis sederhana bahwa apabila kapal dihempas gelombang dari arah samping (sumbu *y*) maka kapal akan cenderung mengalami gerakan menyamping searah sumbu *y* dan rotasi terhadap sumbu *x*. Begitu pula, karena lebar kapal yang lebih pendek daripada panjang kapal, maka gerakan *heave* juga dominan pada saat arah datang gelombang  $90^0$ . Perhatikan bahwa gerakan *roll* beresonansi pada gelombang dengan frekuensi papasan di antara 0.6 hingga 0.9 rad/s pula.

Nilai RAO *roll*, *heave*, dan *sway* yang terjadi lebih besar daripada saat arah datang gelombang  $45^0$ , hal ini bersesuaian dengan RAO saat kapal

sedang terapung bebas di mana gerakan-gerakan tersebut memang mendominasi dan lebih besar dibanding gerakan lain.

Terakhir, gambar 4.12 berikut ini menyajikan kurva-kurva RAO saat arah datang gelombang  $180^0$  dan kapal sedang melaju dengan kecepatan 5 knot melawan arah datang gelombang tersebut.



**Gambar 4.12.** RAO saat Arah Datang  $180^0$  dan Kondisi Melaju 5 Knot

Perhatikan, ada hal yang menarik di sini, frekuensi gelombang papasan yang terjadi bernilai lebih besar daripada frekuensi gelombang yang sebenarnya. Hal ini dikarenakan kapal melaju dengan kecepatan tertentu melawan datangnya gelombang sehingga seolah-olah gelombang datang bertubi-tubi, lebih cepat karena tidak membutuhkan periode yang lama untuk menghempas kapal. RAO yang dihasilkan identik dengan saat arah datang gelombang  $0^0$ , gerakan yang mendominasi adalah gerakan *surge*, *heave*, dan *pitch*, sementara gerakan lainnya sangat kecil atau hampir tidak terjadi sama sekali. Hal ini kembali bersesuaian dengan RAO saat kapal

dalam kondisi terapung bebas, di mana gerakan-gerakan *surge*, *heave*, dan *pitch* lebih mendominasi dibanding gerakan lainnya.

Dari ulasan di atas dapat disimpulkan beberapa hal terkait RAO pada setiap derajat kebebasan dan arah datang gelombang saat kapal sedang melaju dengan kecepatan 5 knot. Hal tersebut disajikan pada tabel berikut ini.

**Tabel 4.7.** Ringkasan RAO Maksimum Kondisi Melaju 5 Knot

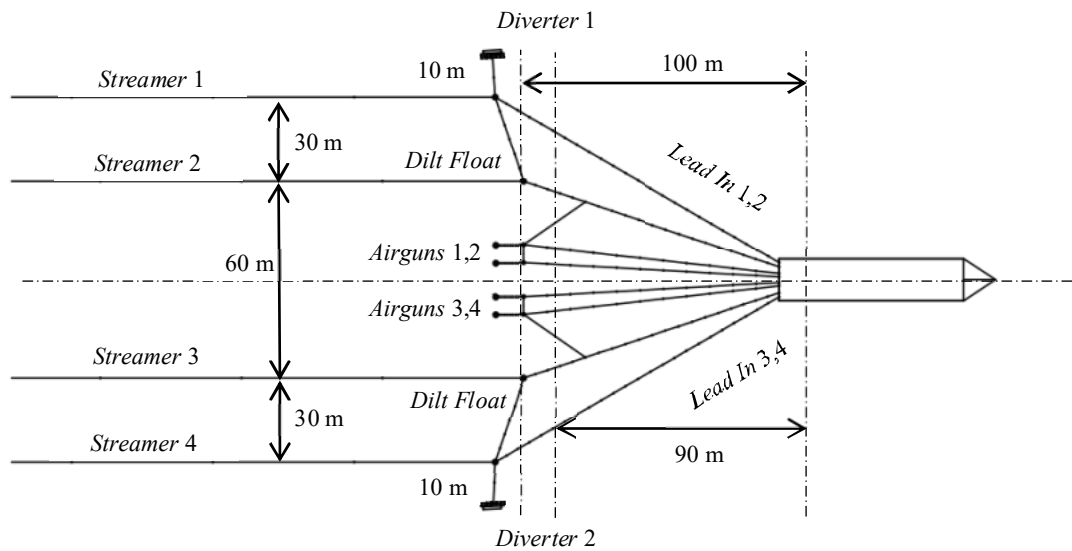
Gerakan	Satuan	RAO Maksimum (5 Knot)			
		0 <sup>0</sup>	45 <sup>0</sup>	90 <sup>0</sup>	180 <sup>0</sup>
<i>Surge</i>	m/m	0.974	0.689	0.002	0.974
<i>Sway</i>	m/m	0.000	0.704	0.995	0.000
<i>Heave</i>	m/m	0.999	0.999	1.214	0.999
<i>Roll</i>	deg/m	0.003	9.593	10.423	0.012
<i>Pitch</i>	deg/m	2.653	2.818	0.748	2.760
<i>Yaw</i>	deg/m	0.000	0.856	0.252	0.000

Tabel di atas menunjukkan bahwa kalkulasi RAO model numerik kapal Geomarin IV yang dilakukan dapat dikatakan benar karena sudah sesuai dengan logika dan hipotesis-hipotesis sederhana, bahwa saat arah datang gelombang 0<sup>0</sup> dan 180<sup>0</sup> nilai RAO gerakan *surge*, *heave*, dan *pitch* lebih besar daripada nilai RAO gerakan *sway*, *roll*, dan *yaw*. Sementara saat arah datang gelombang 90<sup>0</sup> nilai RAO gerakan *sway*, *heave*, dan *roll* lebih besar daripada nilai RAO gerakan *surge*, *pitch*, dan *yaw*. Nilai maksimum RAO setiap arah datang gelombang dan derajat kebebasan telah disajikan pada tabel 4.7 sebelumnya.

#### 4.3. Pemodelan Konfigurasi Peralatan Survei Seismik

Kapal Survei Seismik Geomarin IV dilengkapi dengan berbagai macam peralatan survei seismik. Peralatan-peralatan tersebut di antaranya adalah *airguns* dan *umbilicals*-nya sebagai sumber gelombang suara, *streamer* dengan *hydrophones* sebagai penerima pantulan gelombang suara, *barovane/paravane* yang mengontrol konfigurasi *array* dari sisi, dan *tail buoy*

yang mengontrol konfigurasi *array* dari belakang. Konfigurasi yang sedemikian ini telah dijelaskan secara sederhana pada gambar 2.1 pada awal pembahasan. Konfigurasi ini akan menyesuaikan kondisi lingkungan di mana kegiatan survei seismik dilakukan. Konfigurasi yang digunakan pada pengerjaan Tugas Akhir ini adalah untuk kondisi lingkungan Laut Arafuru dengan kecepatan arus permukaan *omnidirectional* 10 tahunan sebesar 1.28 m/s, beserta tinggi gelombang *omnidirectional* 10 tahunan signifikan sebesar 4.2 m dan periode puncak 9.5s. Konfigurasi untuk kondisi tersebut dapat dilihat pada gambar berikut ini.



**Gambar 4.13.** Konfigurasi Peralatan Survei Seismik yang dimodelkan

**Tabel 4.8.** Streamer Array Built-Up  
(sumber: ION, PT. Citra Mas, 2017)

	Section	Outside	Weight	Working	Breaking	
Section (Number)	Length	Diameter	in Air	Load	Load	Material
	(m)	(mm)	(kg)	(kN)	(kN)	
Streamer Lead-In	100	39	317	95.675	400	Polyurethane
(1)	300		951			Polyurethane
Streamer Cable	100	53	203.1	22.310	-	Polyurethane
(29)						
Tail Stretch (1)	100	53	175.3	13.345	36.49	Nylon

Tabel di atas menunjukkan dimensi utama *streamer* dan kabel-kabel penunjangnya. Setiap *streamer* terhubung dengan peralatan di *deck* oleh kabel *lead in* dan *dilt float*, dan terhubung dengan *tail buoy* di ujung belakang *streamer* oleh kabel *tail stretch*. Fungsi *tail buoy* untuk *streamer* adalah menjaga agar kabel tidak kendur dan tetap pada posisinya selama ditarik. *Tail buoy* ini memiliki sistem GPS dan dikontrol dari *deck* dengan *remote*. *Diverter* digunakan pada sisi kanan dan kiri terluar konfigurasi, fungsinya adalah untuk menjaga seluruh konfigurasi *streamer* dan *airguns array* tetap pada posisinya. Berikut ini adalah dimensi *dilt float*, *tail buoy*, dan *diverter*.

**Tabel 4.9.** Dimensi *Dilt Float*

(sumber: PT. Citra Mas, 2017)

PartnerPlast <i>Dilt Float</i> 1000		
Parameter	Nilai	Satuan
Volume	1000	Liter
<i>Length</i>	3840	mm
<i>Height</i>	900	mm
<i>Width</i>	755	mm
<i>Weight</i>	247	kg ( <i>in air</i> )
<i>Material</i>	<i>Polyethylene</i>	



**Gambar 4.14.** *Dilt Float* 1000

(sumber: PT. Citra Mas, 2017)

**Tabel 4.10.** Dimensi *Tail Buoy*

(sumber: PT. Citra Mas, 2017)

PartnerPlast <i>Tail Buoy</i> 800		
Parameter	Nilai	Satuan
Volume	800	Liter
<i>Length</i>	2390	mm
<i>Height</i>	2350	mm
<i>Width</i>	850	mm
<i>Weight</i>	230	kg ( <i>in air</i> )
<i>Material</i>	<i>Polyethylene</i>	



**Gambar 4.15.** *Tail Buoy* 800

(sumber: PT. Citra Mas, 2017)

**Tabel 4.11.** Dimensi *Diverter/Barovane*  
(sumber: Baro, PT. Citra Mas, 2017)

Baro <i>Barovane 46</i>			
Parameter	Nilai	Satuan	
<i>Length</i>	8000	mm	
<i>Float Diameter</i>	1200	mm	
<i>Weight</i>	1200	kg ( <i>in air</i> )	
<i>Length</i>	6490	mm	
<i>Wing Width</i>	6036	mm	
<i>Weight</i>	5950	kg ( <i>in air</i> )	
<i>Total Buoyancy</i>	9500	kg	



**Gambar 4.16.** *Barovane 46*  
(sumber: PT. Citra Mas, 2017)

Sementara konfigurasi *airguns array* terdiri dari beberapa *airgun* dengan kapasitas yang berbeda-beda dan susunan yang berbeda pula. *Airgun* yang digunakan memiliki kapasitas 140 in<sup>3</sup>, 130 in<sup>3</sup>, 120 in<sup>3</sup>, 100 in<sup>3</sup>, dan 80 in<sup>3</sup>, dimensi-dimensi utama *airguns* akan diberikan pada tabel 4.12 berikut.

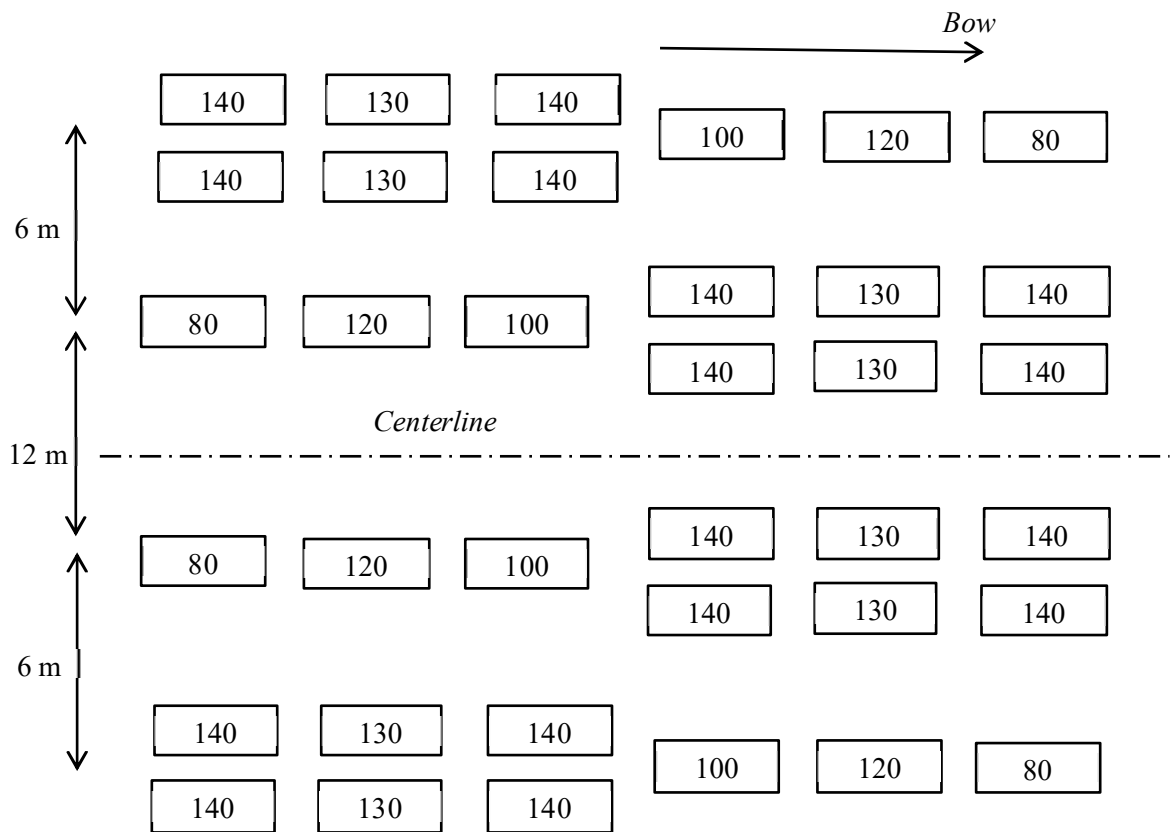
**Tabel 4.12.** Dimensi BOLT *Airguns*  
(sumber: BOLT, PT. Citra Mas, 2017)

<i>Capacity</i>	<i>Length</i> (mm)	<i>Outside Diameter</i> (mm)	<i>Weight in Air</i> (kg)
Bolt 80 in <sup>3</sup>	670	223	74
Bolt 100 in <sup>3</sup>	695	223	75
Bolt 120 in <sup>3</sup>	720	223	76
Bolt 130 in <sup>3</sup>	730	223	76.5
Bolt 140 in <sup>3</sup>	740	223	77

**Tabel 4.13.** Dimensi *Airgun Umbilical*  
(sumber: PT. Citra Mas, 2017)

Sercel <i>Umbilical Sentinel RD</i>	
Parameter	Nilai
Panjang	90 m
Diameter	55 mm
Berat di Udara	2.754 kg/m
Material	Polyurethane

Setiap *array* terdiri dari *airguns* dengan kapasitas-kapasitas tersebut yang disusun dengan konfigurasi yang berbeda, hal ini ditunjukkan pada halaman selanjutnya.



**Gambar 4.17.** Konfigurasi *Airguns* setiap *Array*  
(sumber: PT. Citra Mas, 2017)

Pada setiap *array*, *airguns* tersebut dipasang pada sebuah *floater* yang memiliki *clamp* untuk menggantungkan *airgun* pada *floater*. *Floater* inilah yang akan memberikan gaya apung yang besar pada konfigurasi *airguns*.

**Tabel 4.14.** Dimensi Baro *FlexFloat*  
(sumber: Baro, PT. Citra Mas, 2017)

<i>Section (Number)</i>	<i>Section Length</i>	<i>Outside Diameter</i>	<i>Weight in Air</i>	<i>Material</i>
	(mm)	(mm)	(kg)	
<i>Front Float (1)</i>	3695	800	280	<i>High Density Polyethylene</i>
<i>Floating Hose (5)</i>	700	457.2	-	<i>High Density Polyethylene</i>
<i>Center Float (4)</i>	1750	630	130	<i>High Density Polyethylene</i>
<i>End Connector (1)</i>	1750	460	26.1	<i>High Density Polyethylene</i>

*Floater* ini memiliki berat total di udara sebesar 826.1 kg dan *total buoyancy* sebesar 4220 kg. Keseluruhan peralatan survei seismik dimodelkan dengan menggunakan bantuan *software* OrcaFlex untuk *streamer* yang ditarik sepanjang 3000 m dan *airguns* ditarik pada jarak 90 m dari buritan kapal Geomarin IV.

#### 4.4. Analisis Gerakan Kapal Survei Seismik Geomarin IV saat Operasi

Analisis gerakan kapal dilakukan bersamaan dengan analisis gaya tarik *airgun umbilical*. Hal ini dilakukan dengan mensimulasikan kegiatan survei seismik dilakukan selama 3 jam (10800 detik). Kapal bergerak dengan kecepatan 5 knot searah  $0^0$  menarik seluruh peralatan survei. Arah datang gelombang dan arus yang dianalisis adalah  $0^0$  (*following sea*) dan  $180^0$  (*head sea*) karena tentu secara praktis operator akan melakukan operasi survei ketika gelombang dan arus tersebut datang melalui sumbu memanjang kapal.

##### 4.4.1. Spectral Response Density saat Operasi Heading $0^0$

Pada kondisi ini kapal melaju searah dengan gelombang dan arus pada kecepatan 5 knot. Gambar 4.18 hingga 4.20 pada halaman selanjutnya menunjukkan *spectral response density* untuk gerakan Geomarin IV saat melakukan operasi (menarik konfigurasi peralatan survei seismik). Dari *spectral response density* ini, dapat dihitung nilai-nilai stokastik pada tabel berikut ini.

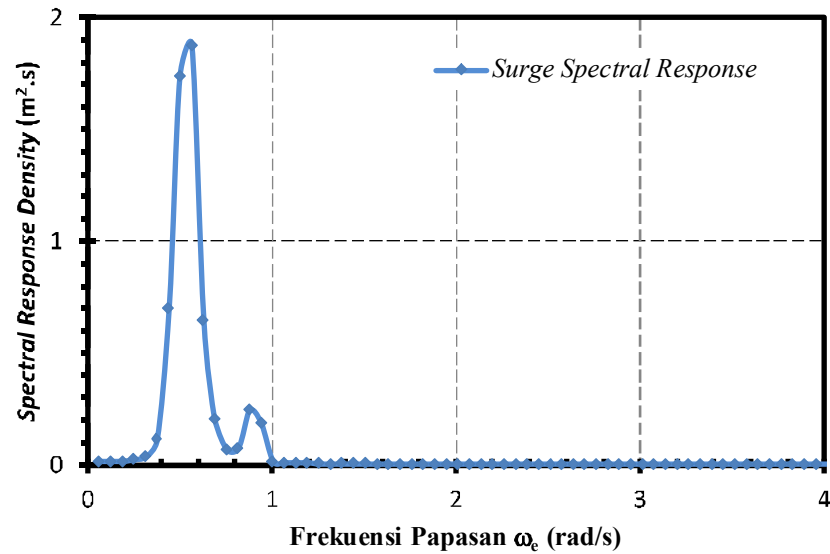
**Tabel 4.15.** *Amplitude* Gerakan Geomarin IV Operasi Survei - Heading  $0^0$

<i>Amplitude</i>	Rata-rata	Signifikan	Satuan
<i>Surge</i>	0.185	0.295	m
<i>Sway</i>	0.000	0.000	m
<i>Heave</i>	0.318	0.507	m
<i>Roll</i>	0.001	0.000	deg
<i>Pitch</i>	0.894	1.427	deg
<i>Yaw</i>	0.000	0.000	deg



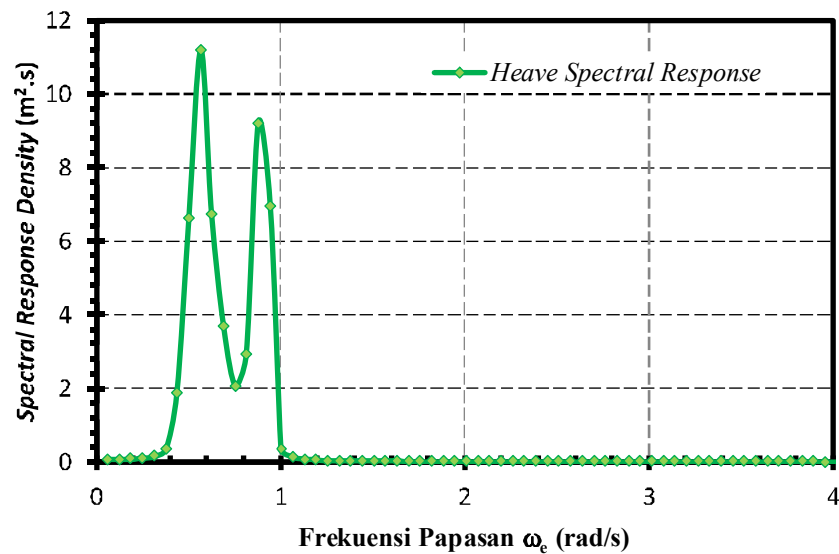
Perhatikan dari tabel di atas, sesuai dengan hipotesis dan logika sederhana, gerakan yang terjadi dominan saat gelombang searah sumbu memanjang kapal (sumbu  $x$ ) adalah gerakan *surge*, *heave*, dan *pitch*, sementara tidak terjadi *sway*, *roll*, dan *yaw* sama sekali.

### ***Surge Spectral Response Density (5 Knot, Heading 0°)***

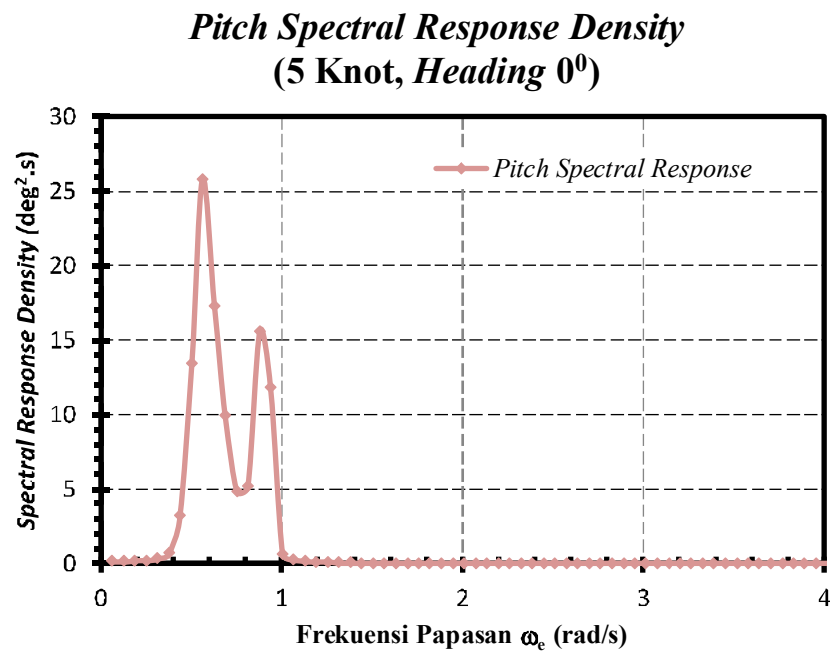


**Gambar 4.18.** *Spectral Response Density Geomarin IV - Surge Heading 0°*

### ***Heave Spectral Response Density (5 Knot, Heading 0°)***



**Gambar 4.19.** *Spectral Response Density Geomarin IV - Heave Heading 0°*



**Gambar 4.20.** *Spectral Response Density Geomarin IV - Pitch Heading 0°*

#### 4.4.2. *Spectral Response Density* saat Operasi Heading 180°

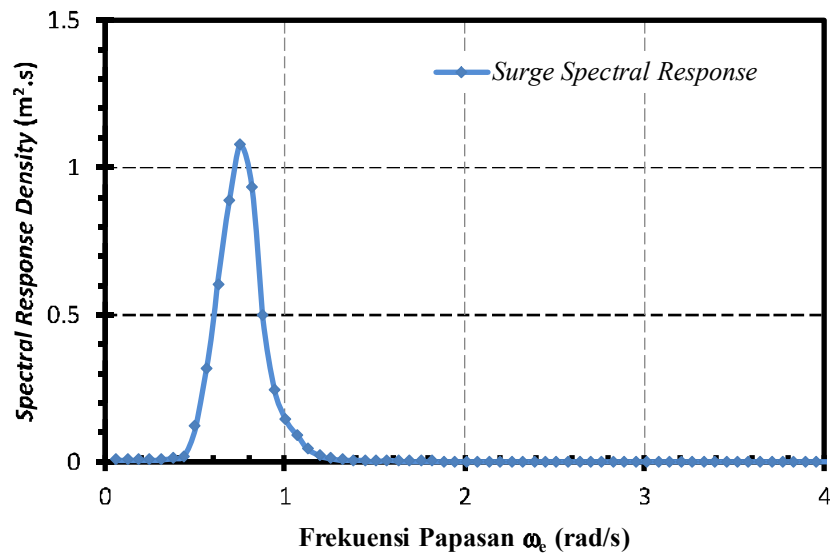
Analisis dilakukan ketika gelombang dan arus datang dari arah 180° (*head sea*) dan kapal Geomarin IV sedang melaju dengan kecepatan 5 knot melawan gelombang dan arus tadi. *Spectral response density* yang mewakili gerakan kapal Geomarin IV saat melakukan operasi survei seismik ditunjukkan pada gambar 4.21 hingga 4.23 di halaman selanjutnya. Kemudian dari *spectral response density* tadi dapat dihasilkan nilai-nilai stokastik yang ditunjukkan pada tabel berikut ini.

**Tabel 4.16.** *Amplitude* Gerakan Geomarin IV Operasi Survei - Heading 180°

<i>Amplitude</i>	Rata-rata	Signifikan	Satuan
<i>Surge</i>	0.209	0.333	M
<i>Sway</i>	0.000	0.000	M
<i>Heave</i>	0.255	0.408	m
<i>Roll</i>	0.001	0.000	deg
<i>Pitch</i>	0.854	1.364	deg
<i>Yaw</i>	0.000	0.000	deg

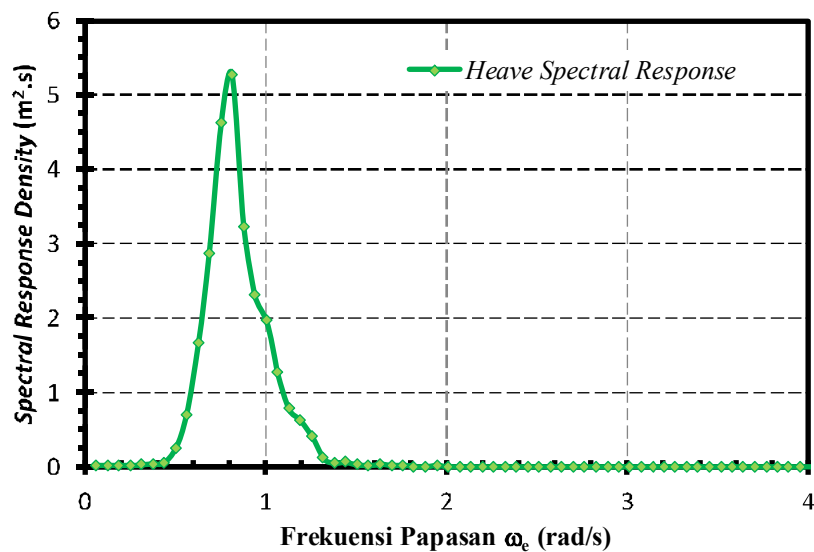
Dari tabel di atas diketahui, sesuai dengan hipotesis dan logika sederhana bahwa apabila beban datang pada sumbu memanjang kapal (sumbu  $x$ ) gerakan yang dominan terjadi adalah gerakan *surge*, *heave*, dan *pitch*, sementara tidak terjadi sama sekali gerakan *sway*, *roll*, dan *yaw*.

### ***Surge Spectral Response Density (5 Knot, Heading 180°)***

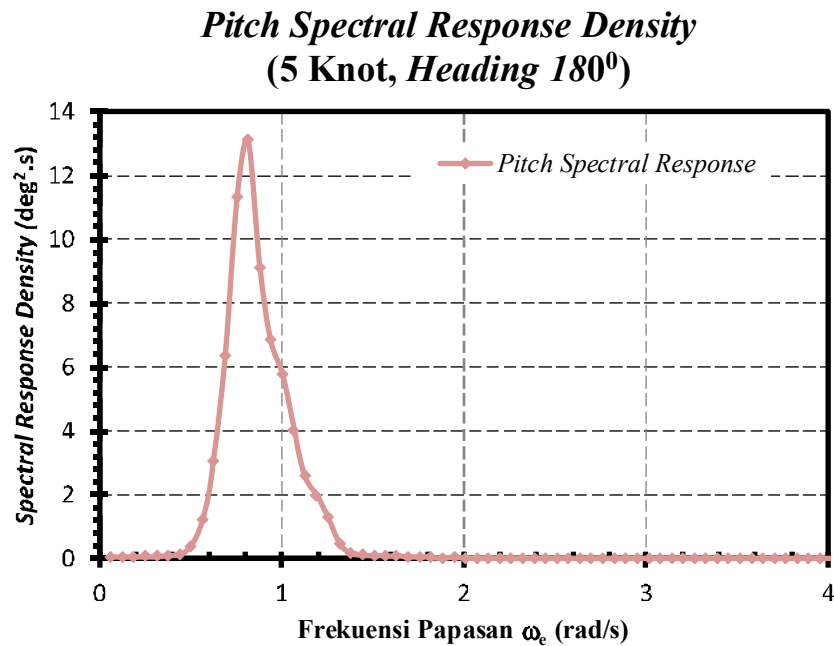


**Gambar 4.21.** *Spectral Response Density Geomarin IV - Surge Heading 180°*

### ***Heave Spectral Response Density (5 Knot, Heading 180°)***



**Gambar 4.22.** *Spectral Response Density Geomarin IV - Heave Heading 180°*



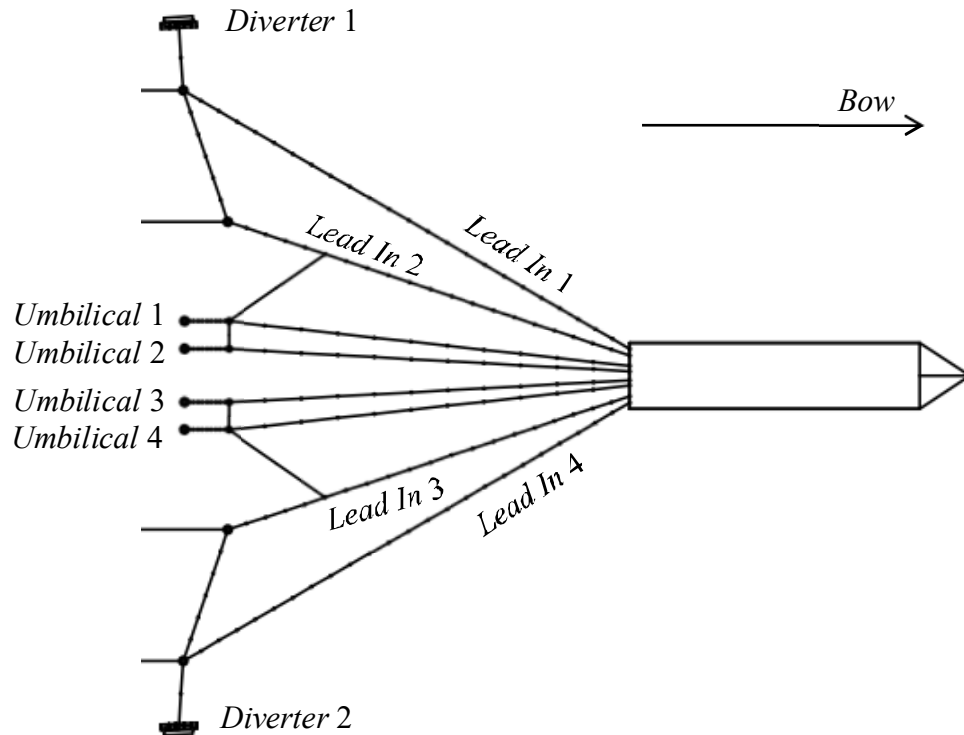
**Gambar 4.23.** *Spectral Response Density Geomarin IV - Pitch Heading 180<sup>0</sup>*

Seluruh kurva-kurva *spectral response density* di atas menunjukkan beberapa hal penting, bahwa frekuensi gelombang yang berkontribusi besar pada respon Geomarin IV saat melakukan operasi (menarik konfigurasi peralatan survei seismik) adalah pada sekitaran 0.4 rad/s hingga 1 rad/s. Hal ini berlaku baik untuk arah 0<sup>0</sup> dan 180<sup>0</sup>.

#### **4.5. Analisis Gaya Tarik *Airgun Umbilical* dan *Lead In - Streamer***

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa analisis gaya tarik *airgun umbilical* dilakukan bersama-sama dengan analisis gerakan Geomarin IV. Hal ini dilakukan dengan mensimulasikan kegiatan survei seismik dilakukan selama 3 jam (10800 detik). Kapal bergerak dengan kecepatan 5 knot searah 0<sup>0</sup> menarik seluruh peralatan survei. Pada prinsipnya, pergerakan (*displacement*) relatif antara gerakan kapal dan kabel didapatkan dari persamaan geraknya dengan gaya-gaya lingkungan sebagai gaya eksternalnya. *Displacement* yang terjadi secara sederhana kemudian dihubungkan dengan Hukum Hooke untuk didapatkan tegangan yang terjadi. Dari tegangan yang didapat, apabila diketahui luas penampang efektif kabel maka bisa dihitung gaya tarik yang terjadi pada kabel tadi. Seluruh perhitungan tegangan

dilakukan bantuan *software* OrcaFlex dengan mempertimbangkan gerakan kapal dan konfigurasi peralatan survei seismik di gelombang acak.



**Gambar 4.24.** Konfigurasi Peralatan Survei Seismik

Kabel yang ditinjau adalah *lead in* dan *umbilical* milik *airgun* dengan penomoran dimulai dari 1 untuk sisi *port* hingga 4 untuk sisi *starboard*. *Lead in* adalah kabel yang menghubungkan *deck* dengan *streamer*, sementara *airgun umbilical* adalah kabel yang menghubungkan *deck* dengan *airgun*. Dari simulasi yang dilakukan selama 3 jam (10800) detik didapatkan nilai-nilai gaya tarik maksimum yang disajikan pada tabel berikut ini.

**Tabel 4.17.** Gaya Tarik Maksimum pada *Lead In*

Heading	Cable Tension	Lead In (kN)			
		No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
0°	Maximum Tension	135.38	31.99	33.97	138.86
180°	Maximum Tension	253.42	183.58	179.98	292.24

**Tabel 4.18.** Gaya Tarik Maksimum pada *Airgun Umbilical*

<i>Heading</i>	<i>Cable Tension</i>	<i>Airgun Umbilical</i> (kN)			
		No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
0 <sup>0</sup>	<i>Maximum Tension</i>	12.16	12.16	12.16	12.16
180 <sup>0</sup>	<i>Maximum Tension</i>	23.70	23.70	23.70	23.70

Perhatikan tabel 4.16 yang menyajikan gaya tarik maksimum pada kabel *lead in* yang menghubungkan peralatan di *deck* dengan *streamer*, dari tabel tersebut dapat diketahui beberapa hal penting sebagai berikut;

- Untuk semua arah beban-beban lingkungan, gaya tarik maksimum terjadi pada *lead in* nomor 1 dan nomor 4 yang berada pada sisi terluar konfigurasi. Hal ini karena keberadaan *diverter/barovane* yang memberikan gaya lateral untuk menjaga konfigurasi tetap pada posisinya, sehingga *lead in* terluar tentu akan mendapatkan gaya tarik yang lebih besar dibanding *lead in* yang berada di sisi dalam.
- Gaya tarik maksimum akan bernilai lebih besar pada saat arah beban-beban lingkungan 180<sup>0</sup> (*head sea*), yaitu ketika kapal melakukan operasi melawan arah beban-beban lingkungan. Hal ini sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan oleh Wardana (2016) dan Srivastava *et al.* (2011) bahwa gaya tarik akan bernilai lebih besar saat konfigurasi ditarik melawan arah beban-beban lingkungan.

Perhatikan pula tabel 4.17 yang menyajikan gaya tarik maksimum pada kabel *umbilical* yang menghubungkan peralatan di *deck* dengan *airgun*, dari tabel tersebut dapat diketahui pula beberapa hal penting sebagai berikut;

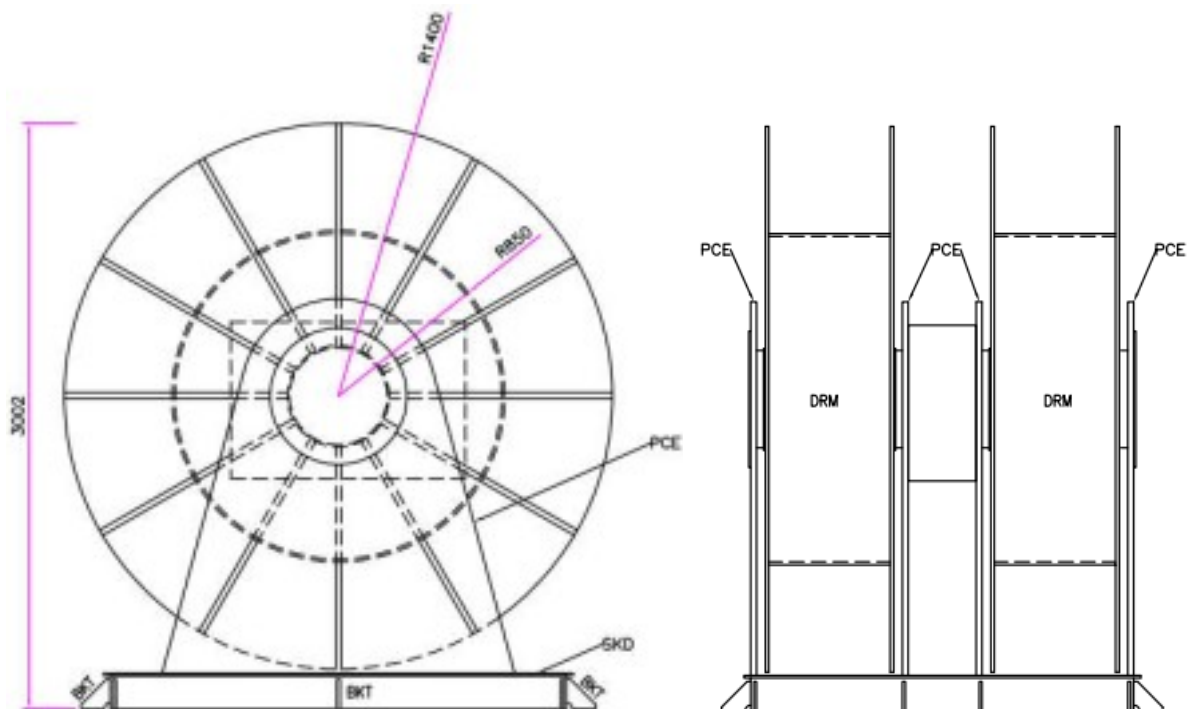
- Gaya tarik maksimum yang terjadi pada *umbilical* akan bernilai jauh lebih kecil daripada gaya tarik pada *lead in*. Hal ini dapat dijelaskan secara sederhana seperti ini, *lead in* menyambungkan *streamer* yang panjangnya hampir 3000 m, selain itu di ujung *streamer* terdapat *tail buoy* yang menjaga *streamer* untuk tidak terbelit satu sama lain, konfigurasi yang sedemikian rupa menyebabkan beban-beban lingkungan juga semakin besar (yang tersekspos dengan lingkungan

semakin luas/panjang), ditambah dengan adanya *diverter/barovane* yang memberikan gaya tarik tambahan. Hal lainnya adalah, konfigurasi *airgun* yang diletakkan pada *floater* (*floater* memiliki daya apung yang sangat besar, 4220 kg, sementara berat total *airguns* hanya 826.1 kg) menyebabkan konfigurasi *arigun* menjadi lebih ringan, ditambah *umbilical* yang panjangnya hanya 90 meter.

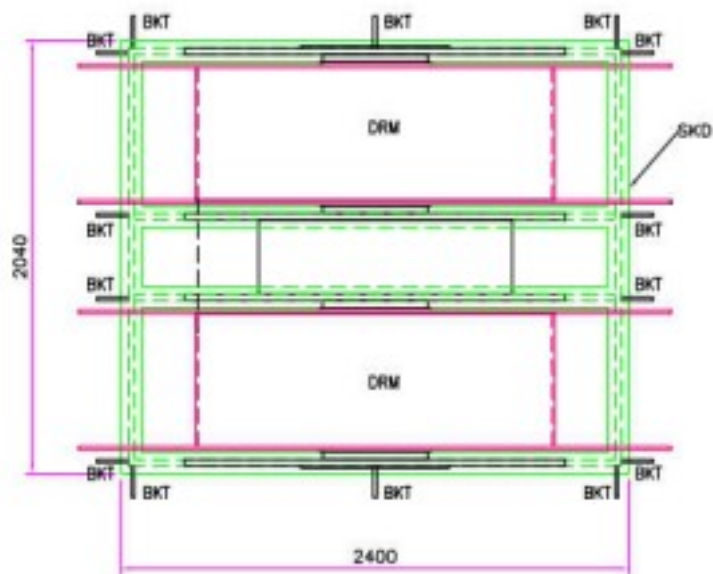
- Berbeda dengan *lead in*, gaya tarik maksimum yang terjadi nilainya hampir sama pada setiap nomor *umbilical*. Hal ini dikarenakan letaknya yang berada tepat dan tidak jauh di belakang kapal dan dampak dari *diverter/barovane* sudah tidak terlalu berpengaruh.
- Identik dengan *lead in*, gaya tarik maksimum juga bernilai lebih besar pada saat arah beban-beban lingkungan  $180^0$  (*head sea*), yaitu ketika kapal melakukan operasi melawan arah beban-beban lingkungan.

#### 4.6. Pemodelan Konstruksi Pondasi *Airgun Umbilicals Winch Roller*

Detail konstruksi pondasi *airgun umbilicals winch roller* dapat dilihat pada gambar berikut ini.

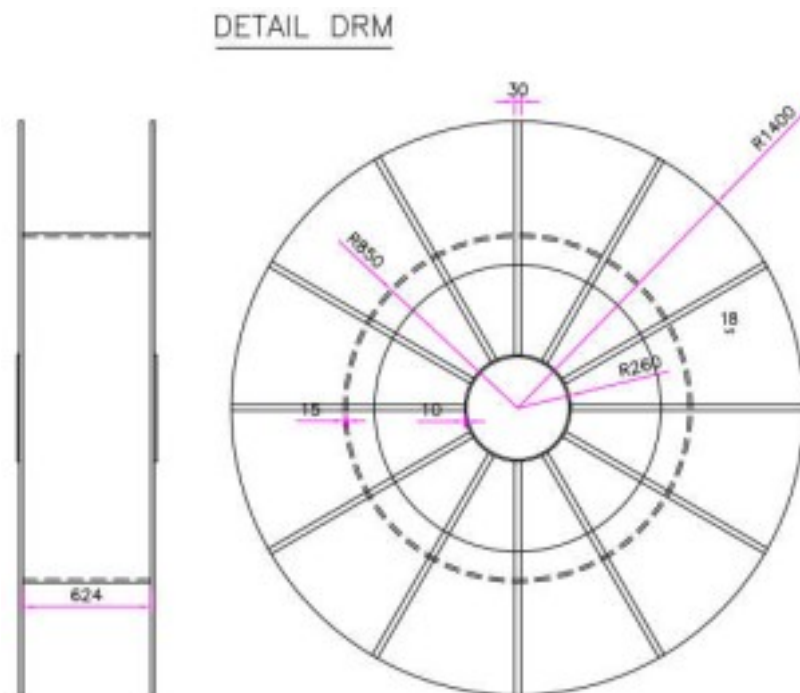


**Gambar 4.25.** Konstruksi Pondasi *Airgun Umbilicals Winch Roller*  
(Tampak Samping dan Depan)



**Gambar 4.26.** Konstruksi Pondasi *Airgun Umbilicals Winch Roller*  
(Tampak Atas)

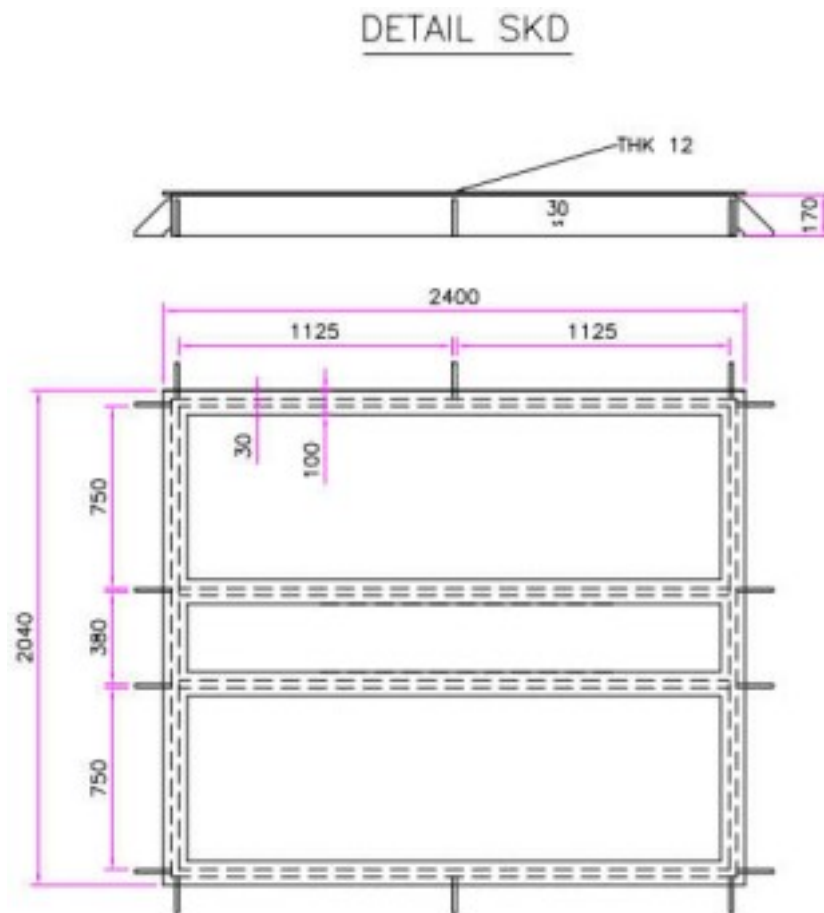
BKT pada gambar di atas adalah *bracket*, DRM adalah *drum*, SKD adalah dudukan, dan PCE adalah kupingan dari dudukan. Secara umum, konstruksi pondasi *airgun umbilicals winch roller* memiliki ukuran 2400 x 2040 x 3000 mm (panjang, lebar, dan tinggi).



**Gambar 4.27.** Detail Bagian *Drum*

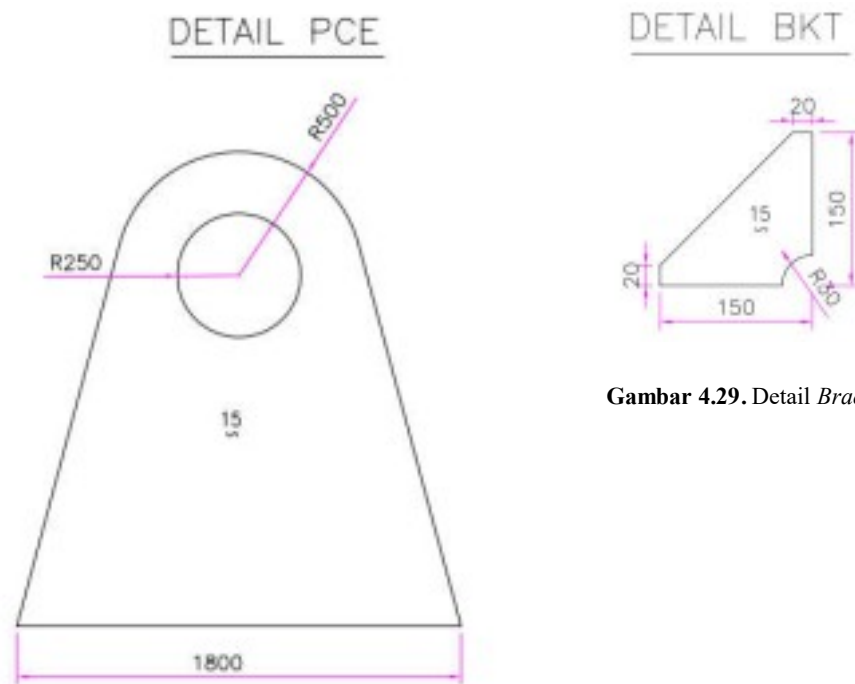


Plat luar berdiameter 2800 mm dengan tebal 18 mm, sementara *drum* berdiameter luar 1700 mm, dengan tebal 15 mm. Porosnya berdiameter 500 mm. *Drum* memiliki lebar sebesar 624 mm. Sementara itu, detail dudukan pondasi dapat dilihat pada gambar berikut ini.



**Gambar 4.28.** Detail Bagian Dudukan

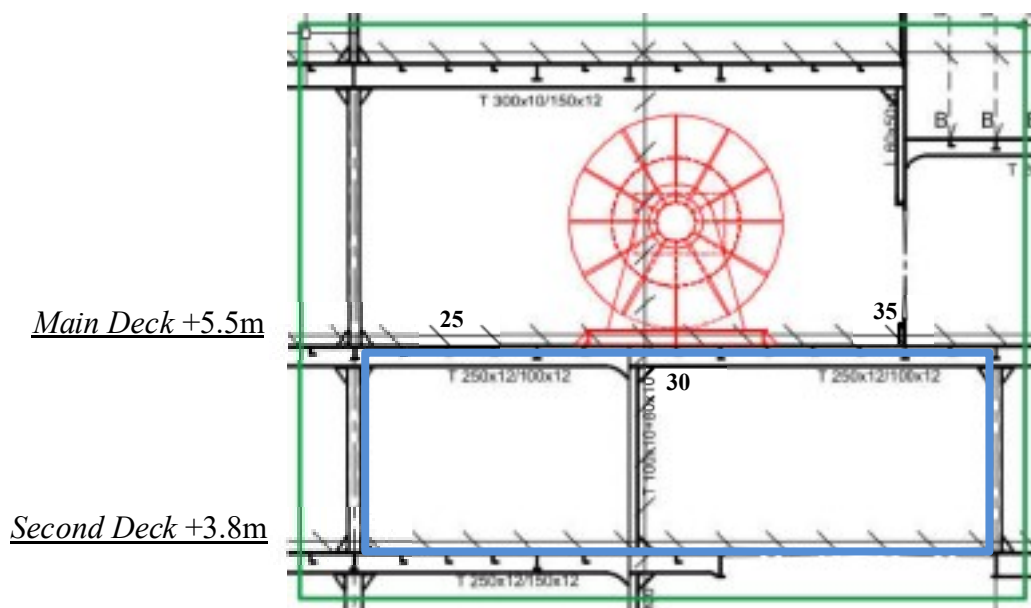
Dapat diperhatikan dari gambar di atas, terdapat total 14 *bracket* yang menopang dudukan pada *deck* Geomarin IV, 3 pada setiap sisi memanjang, dan 4 pada setiap sisi melintang. Secara umum bentuk dudukan ini seperti persegi berukuran 2400 x 2040 mm, dengan ketebalan plat atas setebal 12 mm. Detail dari bagian kupingan dan *bracket* dapat dilihat pada gambar yang disajikan pada halaman berikutnya. Keseluruhan konstruksi tadi dimodelkan secara tiga dimensi dengan bantuan *software* pemodelan pada umumnya.



**Gambar 4.29.** Detail *Bracket*

**Gambar 4.30.** Detail Bagian Kupingan

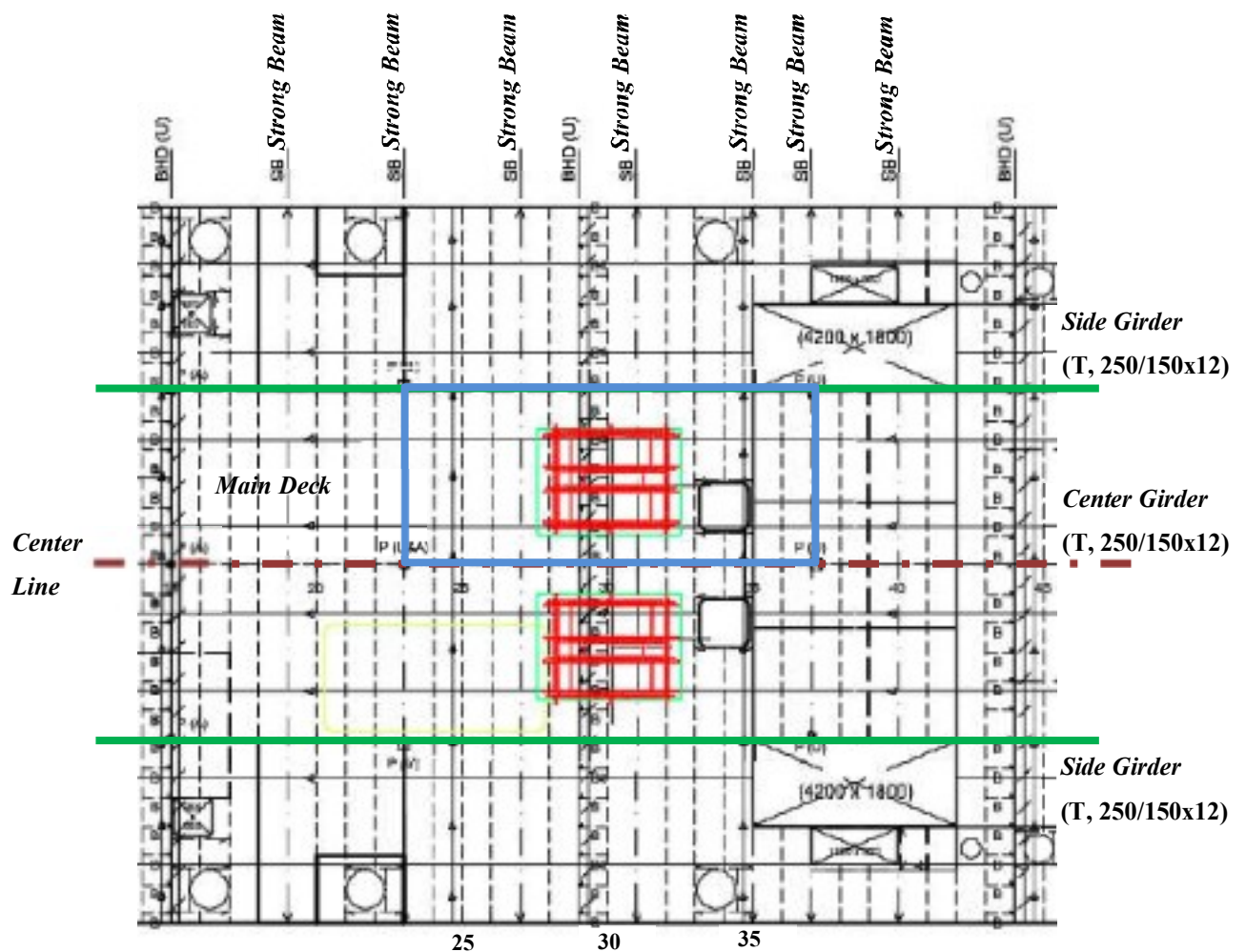
*Bracket* berukuran 150 x 150 mm, dengan jari-jari pengelasan 30 mm dan ketebalan 15 mm, seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.29 di atas. Posisi peletakkan *bracket-bracket* tersebut telah ditunjukkan pada gambar 4.28 sebelumnya. Perhatikan gambar berikut ini.



**Gambar 4.31.** Persegi Biru adalah Struktur *Main Deck* yang Dimodelkan  
(sumber: PT. Citra Mas, 2017)

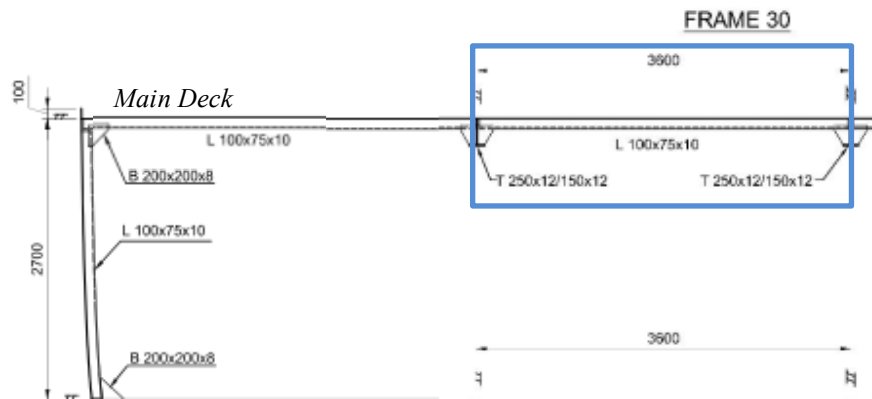
Konstruksi pondasi *winch roller* untuk *airgun umbilicals* dimodelkan pada *main deck* Geomarin IV, mulai *frame* 23 hingga *frame* 37 sepanjang 8400 mm, yaitu di antara dua *strong beam* (*frame* 23 dan 37 adalah *strong beam*). Sementara secara melintang, konstruksi tersebut dimodelkan di antara *center girder* dan *side girder* yang berada pada jarak 3600 mm. Hal ini dilakukan karena dua *girder* tersebut dianggap kuat, dan untuk mengurangi beban komputer dalam menyelesaikan permasalahan metode elemen hingga. Di antara *frame* 23 hingga *frame* 37 terdapat sebuah *bulkhead* pada *frame* 29.

Karena struktur kapal yang simetris secara melintang pada *frame* tersebut, maka pemodelan bisa dilakukan pada salah satu sisi kapal, *port* atau *starboard* saja. Pada pembahasan kali ini, dimodelkan pada sisi *port* kapal saja.



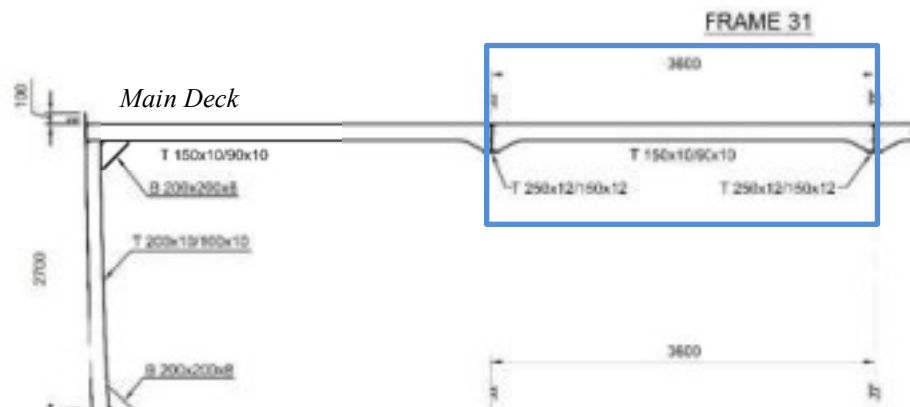
Gambar 4.32. Persegi Biru adalah Struktur *Main Deck* yang Dimodelkan  
(sumber: PT. Citra Mas, 2017)

Pada bagian *main deck*, *frame* 24-26, 28, 30, 32-34, dan 36 memiliki konfigurasi yang sama, yaitu *beam* berpenampang L dengan ukuran 100 x 75 x 10 mm, diapit oleh *center girder* dan *side girder* sejauh 3600 mm. Hal ini ditunjukkan pada gambar berikut.



**Gambar 4.33.** *Frame 30 Main Deck*, Sama dengan *Frame* 24-26, 28, 32-34, 36  
(sumber: PT. Citra Mas, 2017)

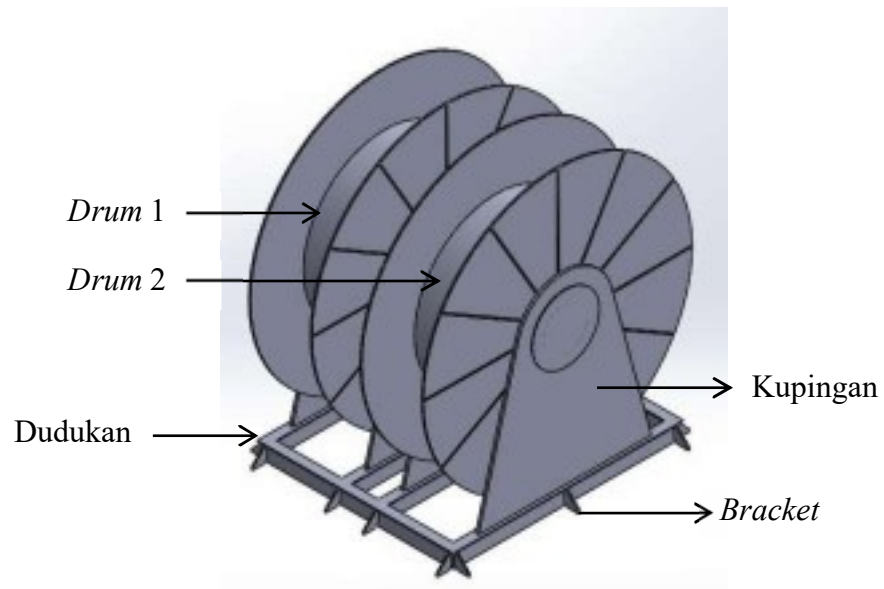
Sementara *frame* 23, 27, 31, 35, dan 37 memiliki konfigurasi yang sama, yaitu merupakan *strong beam* berpenampang T dengan ukuran 150/90 x 10 mm, yang diapit pula oleh *center girder* dan *side girder* sejauh 3600 mm. Hal ini ditunjukkan pada gambar berikut ini.



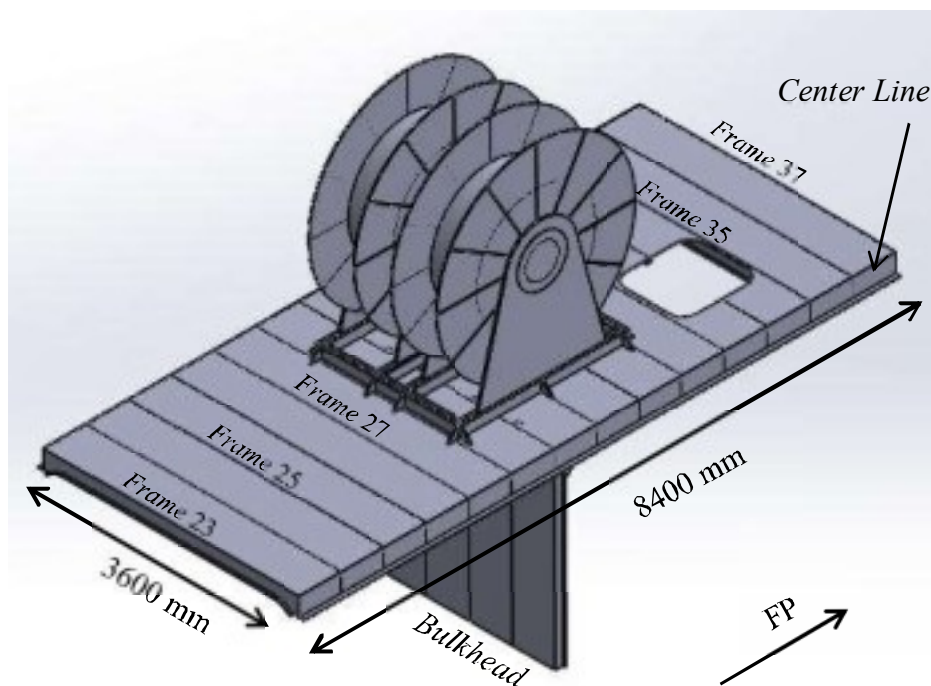
**Gambar 4.34.** *Frame 31 Main Deck*, Sama dengan *Frame* 23, 27, 35, dan 37  
(sumber: PT. Citra Mas, 2017)

Pada *frame* 29 terdapat *bulkhead* yang diperkuat *stiffener* berpenampang L dengan ukuran 75 x 75 x 9 mm secara vertical pada jarak 600 m, sementara pada *centerline bulkhead* diperkuat *stiffener* berpenampang T dengan ukuran 100/80 x 10 mm.

Pemodelan tiga dimensi dari konstruksi pondasi *winch roller* untuk *airgun umbilicals* pada sisi *port* kapal survei seismik Geomarin IV ditunjukkan pada gambar berikut ini (*drum 1* untuk *umbilical* nomor 1, dan *drum 2* untuk *umbilical* nomor 2).



**Gambar 4.35.** Pemodelan Konstruksi Pondasi *Airgun Umbilicals Winch Roller*



**Gambar 4.36.** Pemodelan Tiga Dimensi Keseluruhan pada *Main Deck*

Kemudian, material yang digunakan baik untuk struktur kapal dan pondasi *airgun umbilicals winch roller* adalah baja A36 dengan karakteristik sebagai berikut,

- massa jenis : 4.85 ton/m<sup>3</sup>
- modulus elastisitas : 200 GPa
- Poisson *ratio* : 0.3
- *yield stress* : 250 MPa
- *ultimate stress* : 450 MPa

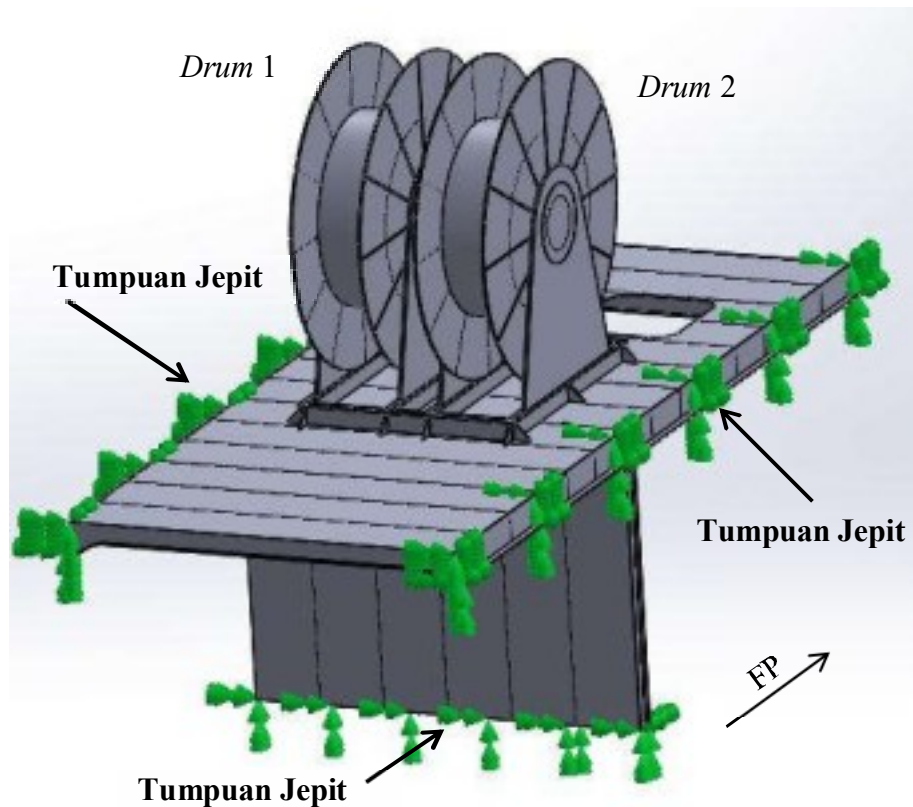
#### **4.7. Analisis Tegangan Lokal Pondasi *Airgun Umbilicals Winch Roller***

Analisis ini dilakukan untuk mengetahui berapa tegangan maksimum yang terjadi pada konstruksi saat operasi dilakukan. Analisis ini dilakukan dengan bantuan *software* metode elemen hingga yang sudah umum digunakan.

Syarat-syarat batas perlu didefinisikan sebelum melakukan analisis tegangan lokal pada konstruksi pondasi *airgun umbilicals winch roller*. Syarat-syarat batas ini adalah kondisi tumpuan dan beban yang bekerja. Hal ini akan dijelaskan sebagai berikut.

Pertama, kondisi tumpuan harus ditentukan. Karena struktur yang dianalisis adalah “sebagian kecil” dari struktur yang lebih besar, maka tumpuan-tumpuan perlu ditentukan pada “sebagian kecil” tadi untuk mewakili kondisi yang bersesuaian dengan yang terjadi pada struktur secara keseluruhan (global).

Tumpuan jepit diaplikasikan pada sisi *center girder* dan *side girder* karena *girder-girder* ini adalah yang terbesar dan dianggap kuat (dapat dianggap sebagai tulangan utama pada kapal secara memanjang). Selain itu, tumpuan jepit juga diaplikasikan pada sisi bagian bawah *bulkhead* karena secara sederhana fungsi *bulkhead* selain untuk sekat adalah untuk menyangga *deck* secara melintang. Penentuan tersebut juga dilakukan mengingat *bulkhead* tersambung dengan *second deck* yang ada di bawah *main deck*. Sementara *strong beam* pada ujung-ujung terluar model, yaitu pada *frame 23* dan *frame 37* dibiarkan sebagai tumpuan bebas. Kondisi tumpuan yang dimaksud dapat dilihat pada gambar di halaman selanjutnya.

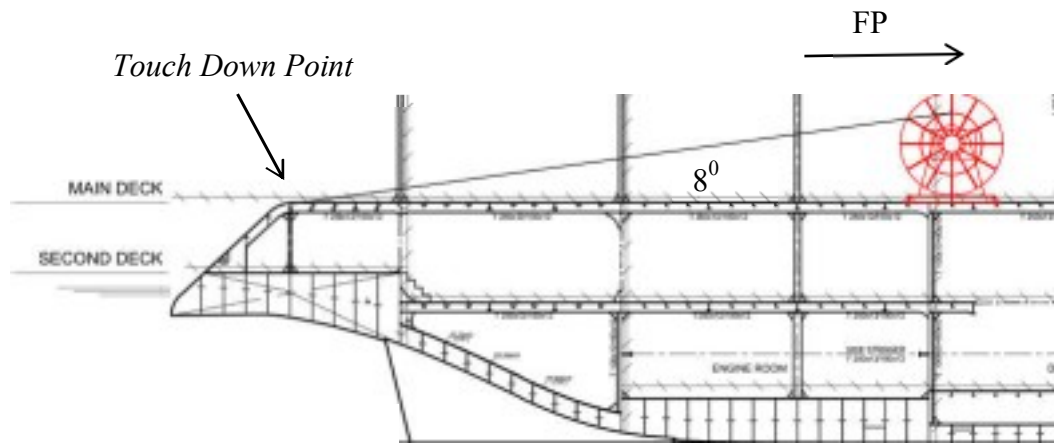


Gambar 4.37. Penentuan Tumpuan untuk Analisis Tegangan Lokal

Kedua, pembebanan harus ditentukan pula. Beban yang diaplikasikan adalah gaya gravitasi dari struktur itu sendiri, ditambah dengan beban-beban eksternal, yaitu gaya tarik maksimum yang terjadi pada *airgun umbilical* saat operasi survei seismik dilakukan. Gaya tarik maksimum telah didapatkan dari hasil analisis sebelumnya (sub bab 4.5), yaitu 23.7 kN pada setiap *umbilical*. Kita tahu bahwa satu konstruksi *winch roller* untuk *airgun umbilicals* terdiri dari dua buah *drum* masing-masing untuk *umbilical*, sehingga kombinasi yang digunakan adalah sesuai hasil dari sub bab 4.5, yaitu 23.7 kN pada *drum 1*, dan 23.7 kN pada *drum 2*.

Arah gaya tarik ini ditentukan dengan menganggap bahwa bentangan *umbilical* sudah habis pada titik tertinggi *drum*, sehingga sudut yang dibentuk oleh *umbilical* dari titik tertinggi *drum* hingga titik *touch down*, dengan *main deck* adalah sebesar  $8^{\circ}$ . Hal ini ditunjukkan secara sederhana pada gambar di halaman berikut.

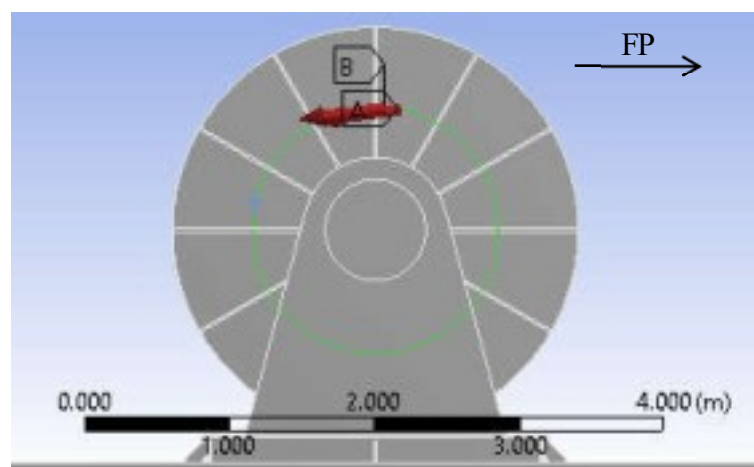




**Gambar 4.38.** Sudut Gaya Tarik *Airgun Umbilical*

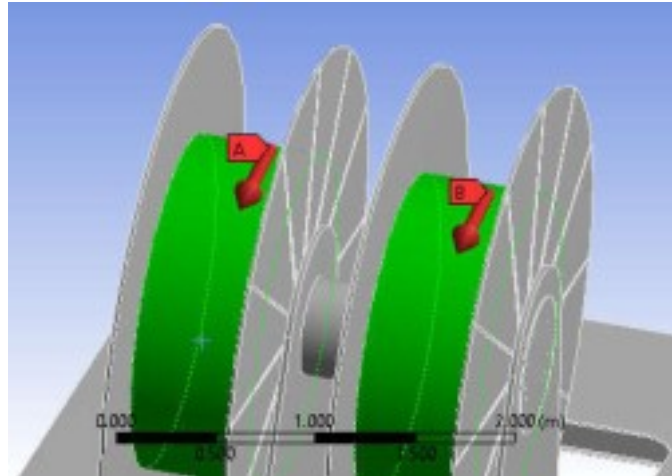
Gaya tarik maksimum yang didapatkan dari sub bab 4.5 perlu dikalikan dengan faktor sesuai dengan yang diberikan oleh DNV *Part 3 Hull, Chapter 11 Hull Equipment, Supporting Structure, and Appendages*, pada *Section 3* terkait “*winches others than those used for mooring and ship towing*”. Tersebut dalam bagian itu bahwa beban yang diaplikasikan adalah 1.1 kali beban maksimum yang terjadi, sehingga beban yang diaplikasikan adalah  $1.1 \times 23.7 \text{ kN} = 26.07 \text{ kN}$  pada masing-masing *drum*.

Seperti yang ditekankan sebelumnya bahwa ujung bentangan terakhir *umbilical* berada pada titik tertinggi *drum*, sehingga beban diaplikasikan tangensial pada sudut  $8^\circ$  terhadap *main deck*. Hal ini ditunjukkan pada gambar berikut. Garis melingkar putus-putus hijau menunjukkan *drum* dan panah merah menunjukkan beban yang diaplikasikan sebesar 26.7 kN ke arah buritan, pada sudut  $8^\circ$  terhadap *main deck*.



**Gambar 4.39.** Beban Tangensial yang Diaplikasikan pada Model



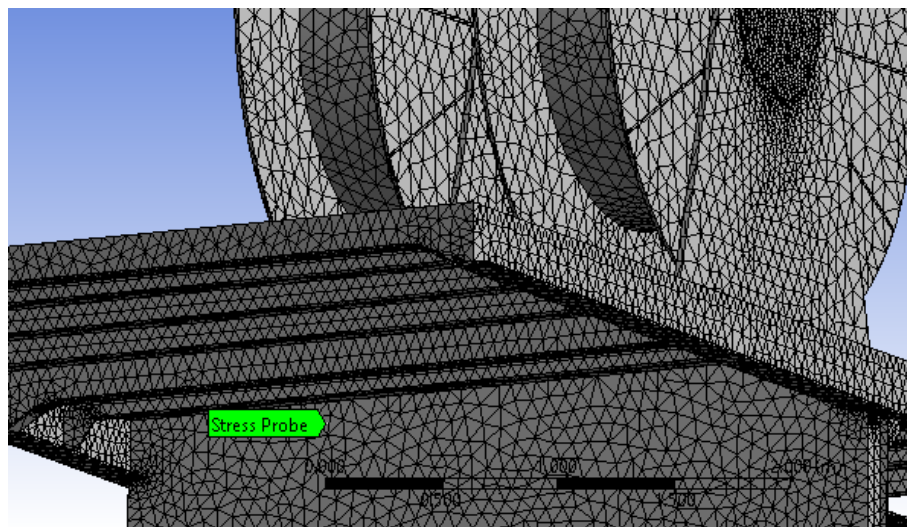


**Gambar 4.40.** Beban Tangensial yang Diaplikasikan pada Model

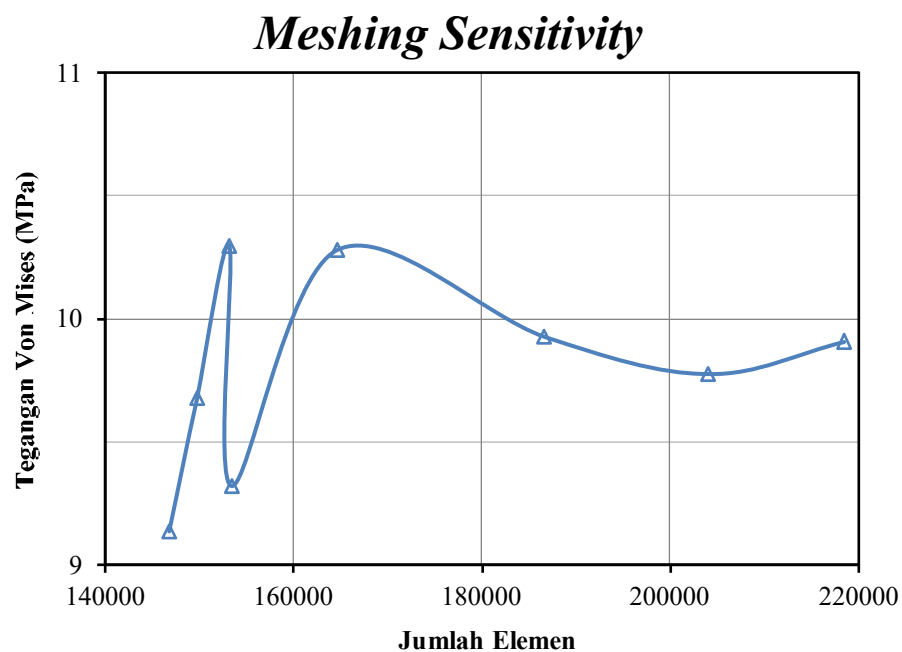
Setelah mendefinisikan syarat-syarat batas, metode elemen hingga digunakan untuk analisis tegangan lokal konstruksi pondasi *winch roller* untuk *airgun umbilicals*. Pada prinsipnya, metode elemen hingga mendiskritkan suatu permasalahan yang besar (*global*) dan rumit menjadi elemen-elemen yang lebih kecil dan lebih sederhana. Elemen-elemen permasalahan yang lebih sederhana ini kemudian diselesaikan, lalu solusi yang dihasilkan dikombinasikan untuk mendapatkan solusi dari permasalahan yang besar (*global*).

Secara umum untuk analisis struktural, proses diskritisasi atau pembagian elemen-elemen yang dimaksud pada paragraf sebelumnya disebut dengan istilah “*meshing*”. *Meshing* sangat berpengaruh terhadap hasil yang ingin didapatkan. Ukuran *meshing* yang terlalu kecil menyebabkan jumlah elemen yang begitu banyak sehingga kapasitas perhitungan komputer yang dibutuhkan semakin besar, yang berujung pada waktu yang dibutuhkan saat penyelesaian dilakukan. Sementara *meshing* yang terlalu besar menyebabkan jumlah elemen yang sedikit; hal ini menjadi suatu hal yang menguntungkan karena kapasitas perhitungan komputer yang dibutuhkan tidak terlalu besar. Namun perlu diperhatikan bahwa jumlah elemen yang terlalu sedikit dapat berpengaruh terhadap akurasi solusi yang dihasilkan, karena tidak dapat mewakili bentuk-bentuk geometri yang berubah secara ekstrim.

Untuk mengatasi permasalahan di atas, perlu dilakukan iterasi ukuran *meshing* yang optimum. Hal ini disebut dengan *meshing sensitivity check*. Ukuran *meshing* diubah secara iteratif, hingga solusi yang dihasilkan pada lokasi tertentu menjadi konvergen, atau tidak mengalami perubahan yang signifikan dari solusi sebelumnya. Solusi ditinjau menggunakan *probe*. Toleransi perubahan solusi yang diterapkan pada pengerjaan Tugas Akhir ini adalah 2%. Perhatikan gambar dan tabel berikut ini.



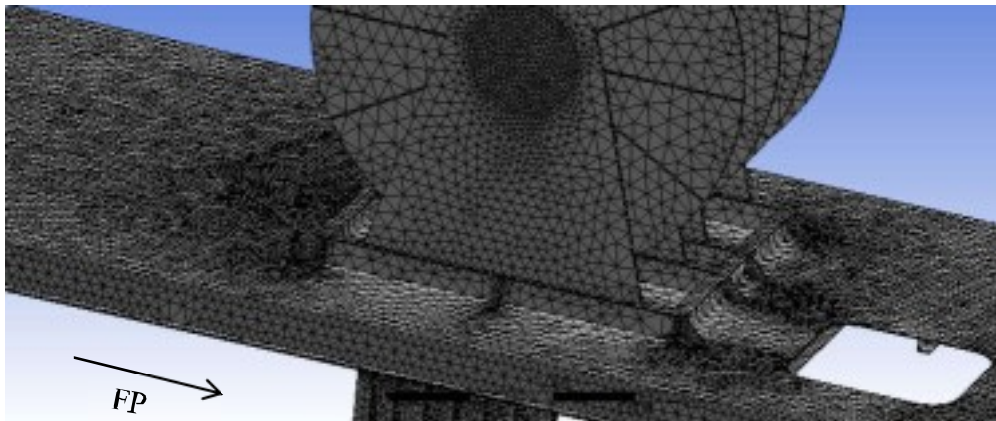
Gambar 4.41. Lokasi *Probe* pada plat *Bulkhead*



Gambar 4.42. *Meshing Sensitivity Check*

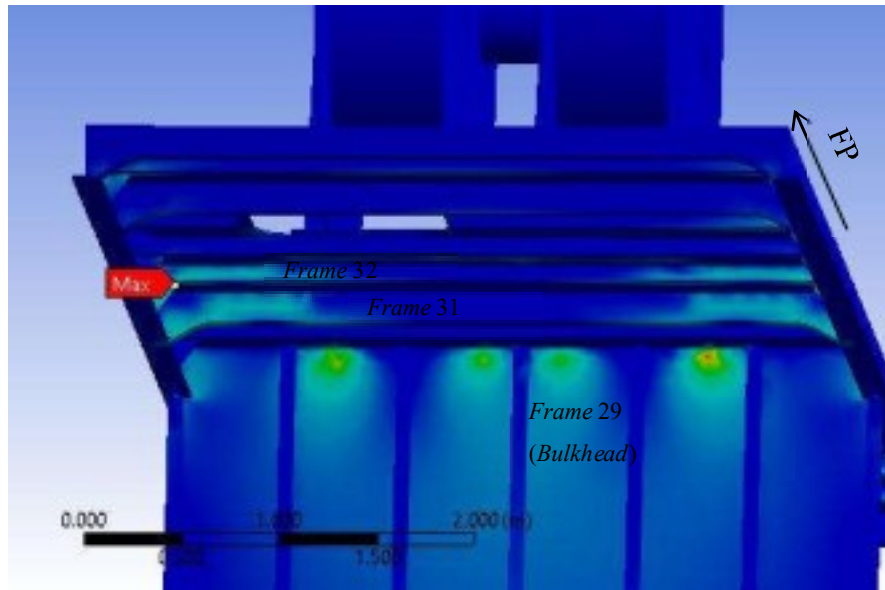
**Tabel 4.19.** *Meshing Sensitivity Check*

<i>Max. Size</i> (mm)	Jumlah Elemen	Von Mises (MPa)	<i>Absolute Error</i>
190	146836	9.14	-
180	149770	9.68	5.9%
170	153204	10.30	6.4%
160	153419	9.32	9.5%
150	164658	10.28	10.3%
140	186599	9.93	3.4%
130	203994	9.77	1.6%
120	218453	9.91	1.4%

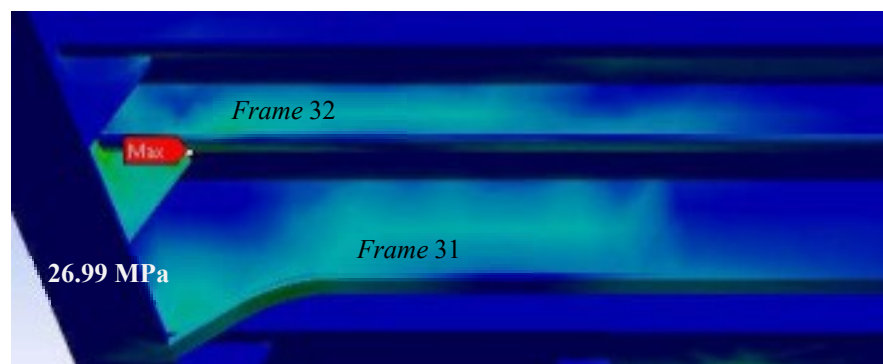


**Gambar 4.43.** *Meshing* untuk Ukuran Elemen Maksimum 120 mm

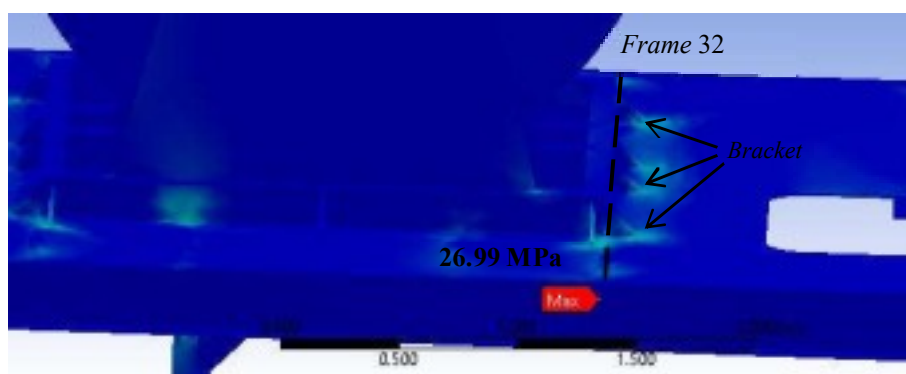
Konvergensi mulai terjadi pada saat ukuran elemen 140 mm hingga 120 mm. Perhatikan bahwa *absolute error* di bawah 2% terjadi pada elemen ukuran 130 mm dan 120 mm (dengan *absolute error* berurutan 1.6% dan 1.4%). Dari informasi tersebut, ukuran *mesh* yang optimum adalah mulai dari 130 mm hingga 120 mm. Ketika diselidiki lebih lanjut, untuk ukuran *mesh* 130 mm, tegangan von Mises maksimum yang terjadi adalah **26.81 MPa**, sementara untuk ukuran *mesh* 120 mm, tegangan von Mises maksimum yang terjadi adalah **26.99 MPa**, keduanya terjadi di lokasi yang sama. Dapat diperhatikan bahwa tidak terjadi perubahan yang signifikan terhadap tegangan von Mises maksimum yang terjadi, sehingga untuk selanjutnya ukuran *mesh* maksimum yang diterapkan adalah 120 mm.



**Gambar 4.44.** Lokasi Terjadinya Tegangan von Mises Maksimum (a)



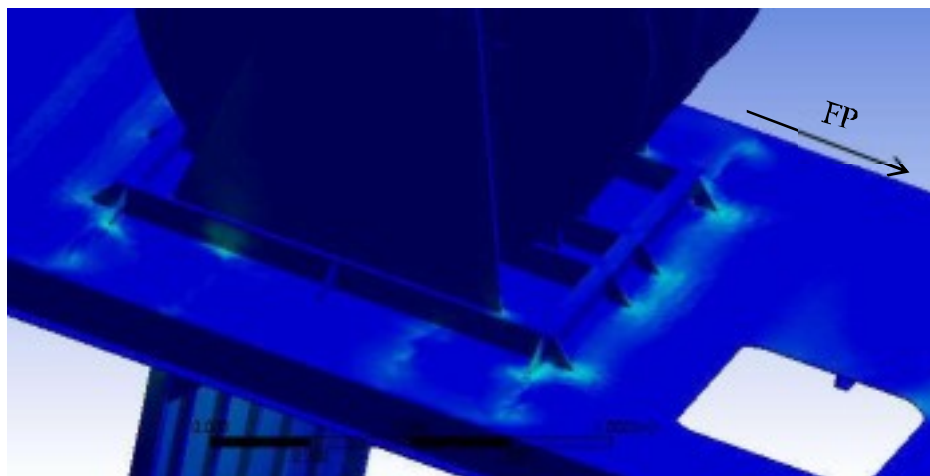
**Gambar 4.45.** Lokasi Terjadinya Tegangan von Mises Maksimum (b)



**Gambar 4.46.** *Frame 32 yang Menumpu Bracket Pondasi*

Tegangan von Mises maksimum yang terjadi pada model adalah 26.99 MPa. Lokasinya berada pada *frame* 32 yang memang menjadi tumpuan *bracket* pondasi *airgun umbilicals winch roller* seperti pada gambar 4.44 hingga 4.46 di halaman sebelumnya. Beban tarik dari *umbilical* diteruskan oleh *bracket* ke *frame* 32 tersebut. Selain itu dapat dilihat pula bahwa terjadi konsentrasi tegangan pada plat *bulkhead* yang menumpu kedudukan pondasi *airgun umbilicals winch roller* (lihat gambar 4.44).

Sementara itu pada setiap *bracket* dan kedudukan *winch roller* terjadi konsentrasi tegangan von Mises, namun tidak terlalu signifikan. Konsentrasi tegangan ini terjadi pada sambungan antara *bracket* dengan plat *main deck*. Nilainya bervariasi, mulai dari 6 MPa hingga 10 MPa, hal ini ditunjukkan pada gambar berikut.



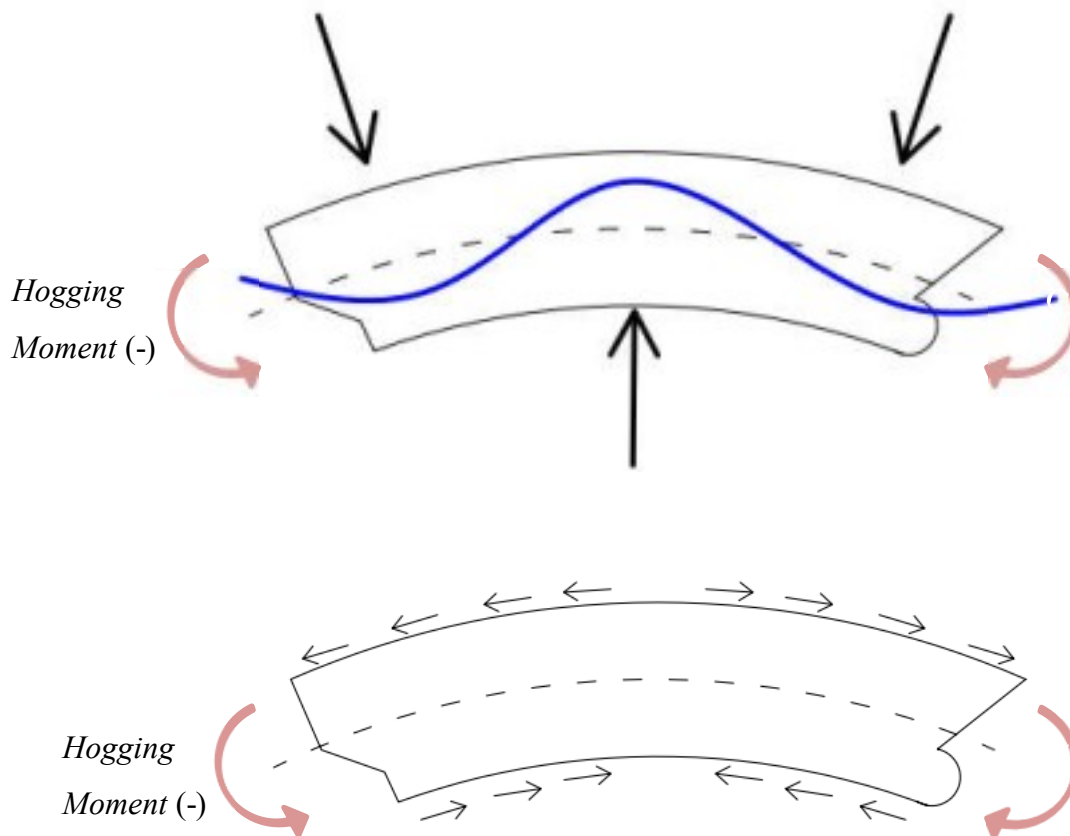
**Gambar 4.47.** Konsentrasi Tegangan pada *Bracket* dan *Main Deck*

Dari seluruh analisis yang dilakukan, diketahui bahwa tegangan von Mises maksimum yang terjadi pada keseluruhan model adalah 26.99 MPa. Nilai ini sangat jauh di bawah *yield stress* material baja A36, atau 26.99 MPa  $\ll$  250 MPa, dengan demikian dapat dikatakan bahwa desain pondasi *winch roller* untuk *airgun umbilicals* beserta *frame-frame* pendukungnya pada kapal survei seismik Geomarin IV sangatlah kuat dengan harga faktor keamanan 9.26 (faktor keamanan adalah perbandingan antara *yield stress* dengan tegangan yang terjadi).

#### 4.8. Pertimbangan *Longitudinal Bending Moment* pada Analisis Tegangan

Perbedaan antara gaya gravitasi struktur kapal dan gaya apung menyebabkan kapal mengalami lenturan tertentu apabila kita menganggap kapal berperilaku seperti sebuah balok menerus. Lenturan ini disebabkan oleh *longitudinal bending moment* (momen lentur) yang terjadi karena perbedaan gaya gravitasi struktur dan gaya apung. Secara umum dapat terjadi dua macam kemungkinan, yaitu *hogging* dan *sagging*.

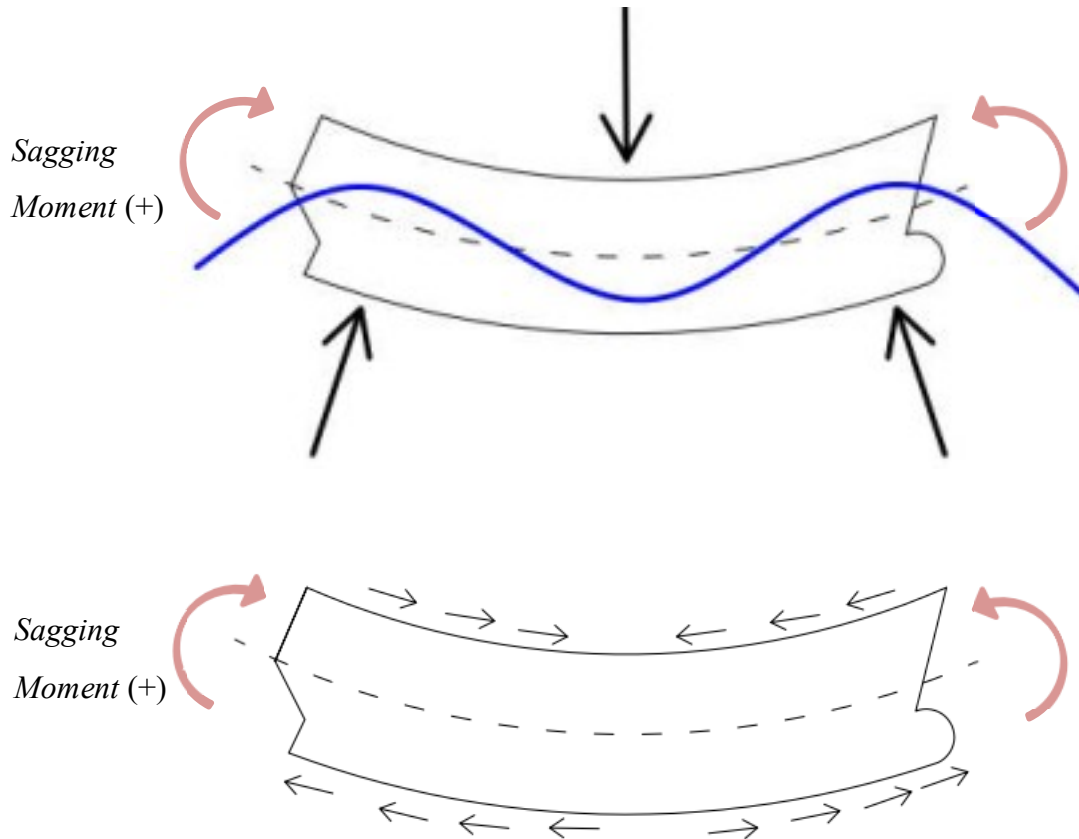
*Hogging* adalah kondisi ketika kapal seakan-akan ditumpu pada bagian tengah kapal, sehingga momen lentur yang terjadi menyebabkan permukaan atas kapal mengalami tarikan (*tension*) dan permukaan bawah kapal mengalami tekanan (*compression*). Hal ini seperti ketika puncak gelombang berada pada bagian tengah kapal. Momen lentur yang demikian ini disebut sebagai momen *hogging* yang nilainya negatif.



**Gambar 4.48.** Ilustrasi Kondisi *Hogging*

(sumber: Dokumentasi Penulis)

Sementara *sagging* adalah kondisi ketika kapal seakan-akan ditumpu pada ujung-ujungnya, sehingga momen lentur yang terjadi menyebabkan permukaan atas mengalami tekanan (*compression*) dan permukaan bawah mengalami tarikan (*tension*). Hal ini seperti ketika puncak gelombang ada pada bagian haluan dan buritan kapal. Momen lentur yang demikian disebut sebagai momen *sagging* yang nilainya positif.



**Gambar 4.49.** Ilustrasi Kondisi *Sagging*

(sumber: Dokumentasi Penulis)

*Longitudinal bending moment* menyebabkan tegangan lentur pada penampang kapal yang menerus. Tegangan lentur ini nilainya akan bervariasi terhadap posisi dari sumbu netral (*neutral axis*) penampang ( $y_s$ ). Hal ini ditunjukkan pada persamaan berikut,

$$\sigma_{l,B} = -\frac{M_{l,B} \times y_s}{I_s} \quad (\text{Pers. 87})$$



di mana  $\sigma_{LB}$  adalah tegangan lentur akibat *bending moment*  $M_{LB}$ ,  $I_s$  adalah momen inersia luas penampang kapal, dan  $y_s$  adalah posisi titik yang ditinjau dari sumbu netral penampang. Sehingga apabila diketahui nilai *bending moment* ( $M_{LB}$ ) dan momen inersia penampang luas penampang kapal, maka tegangan lentur pada posisi tertentu dapat diketahui.

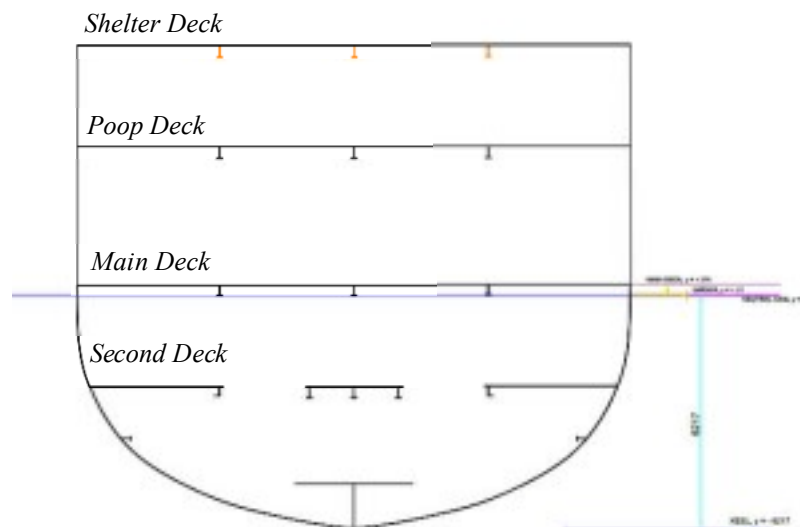
Penerapan *longitudinal bending moment* ini ditujukan sebagai syarat batas tambahan untuk mengetahui bagaimana pengaruhnya terhadap kekuatan model yang telah dibuat. Pada pembahasan Tugas Akhir ini, nilai *longitudinal bending moment* pada *frame 23* adalah sebagai berikut.

**Tabel 4.20.** *Longitudinal Bending Moment* pada *Frame 23*

(sumber: PT. Citra Mas, 2017)

<i>Bending Moment</i> pada <i>Frame 23</i>		
<i>Sagging</i>	<i>Hogging</i>	<i>Unit</i>
16785	-42801	kN-m

Lalu dengan bantuan CAD, momen inersia dan sumbu netral luas penampang menerus pada *frame 23* dapat dihitung. Luas penampang yang menerus ini terdiri dari plat pada setiap *deck*, *girders*, *shell plate*, dan *stiffeners*. Sementara *bulkhead* dan strukur-struktur yang sifatnya lokal tidak diikutsertakan dalam menentukan momen inersia. Perhatikan gambar berikut.



**Gambar 4.50.** Penampang *Frame 23* yang Menerus



Dari hasil perhitungan dengan bantuan CAD terkait letak sumbu netral dan momen inersia penampang pada *frame* 23, diketahui bahwa sumbu netral berada pada jarak **6.217 m** dari *keel*. Sementara posisi tertentu dan momen inersia penampang direkapitulasi dalam tabel berikut.

**Tabel 4.21.** Lokasi Titik-titik Penting pada *Frame* 23

Lokasi titik dari Sumbu Netral ( $y_s$ )		
<i>Shelter Deck</i>	6.391	m
<i>Main Deck</i>	0.274	m
<i>Girder</i>	0.021	m
<i>Bottom</i>	-6.217	m

**Tabel 4.22.** Momen Inersia Penampang *Frame* 23

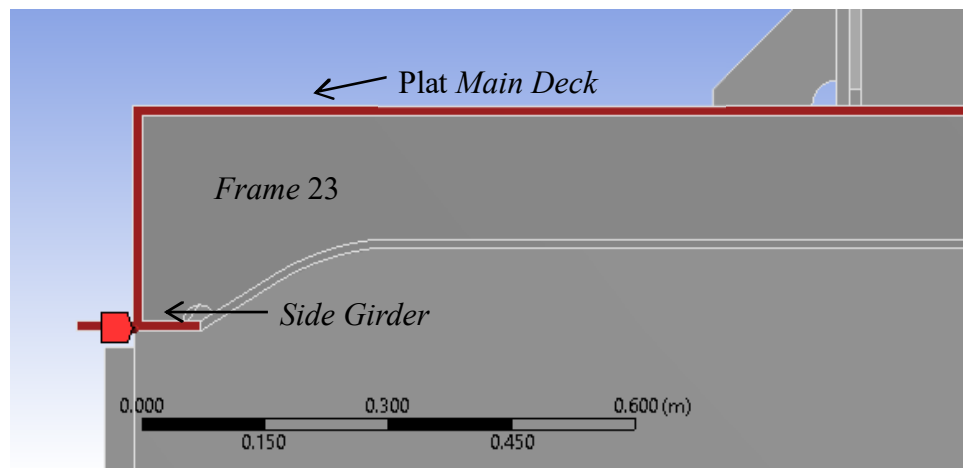
Momen Inersia Terhadap Sumbu Netral		
	1.356E+13	mm <sup>4</sup>
$I_s$	13.563	m <sup>4</sup>

Tegangan lentur yang terjadi pada titik-titik seperti di tabel 4.21 dihitung dengan Pers. 87. *Bending moment* yang diaplikasikan adalah yang terbesar, yaitu ketika *hogging* dengan nilai -42801 kN-m. Tegangan lentur tentu maksimum terjadi pada jarak terjauh dari sumbu netral, yaitu pada *shelter deck*. Karena yang menjadi bahasan adalah plat *main deck* dan *girder* pada *frame* 23, maka tegangan pada lokasi tersebut juga dihitung untuk kemudian digunakan sebagai syarat batas.

**Tabel 4.23.** Tegangan Lentur pada *Frame* 23

Tegangan Lentur ( <i>Hogging</i> )				
<i>Shelter Deck</i>	( <i>Max. Tension</i> )	$y = +6.931$	20.17	MPa
<i>Poop Deck</i>	( <i>Tension</i> )	$y = +3.974$	12.54	MPa
<i>Main Deck</i>	( <i>Tension</i> )	$y = +0.274$	0.86	MPa
<i>Girder</i>	( <i>Tension</i> )	$y = +0.021$	0.07	MPa
<i>Second Deck</i>	( <i>Compression</i> )	$y = -2.417$	-7.63	MPa
<i>Bottom</i>	( <i>Max. Compression</i> )	$y = -6.217$	-19.62	MPa

Nilai rata-rata antara tegangan lentur pada *main deck* dan *girder* digunakan sebagai syarat batas pada *frame 23*, yaitu **0.465 MPa**. Tegangan ini diaplikasikan pada penampang plat *main deck* dan *girder* (*side* dan *center girder*). Hal ini ditunjukkan pada gambar berikut, daerah merah menunjukkan tempat di mana tegangan lentur diaplikasikan keluar bidang (mengalami tarikan).

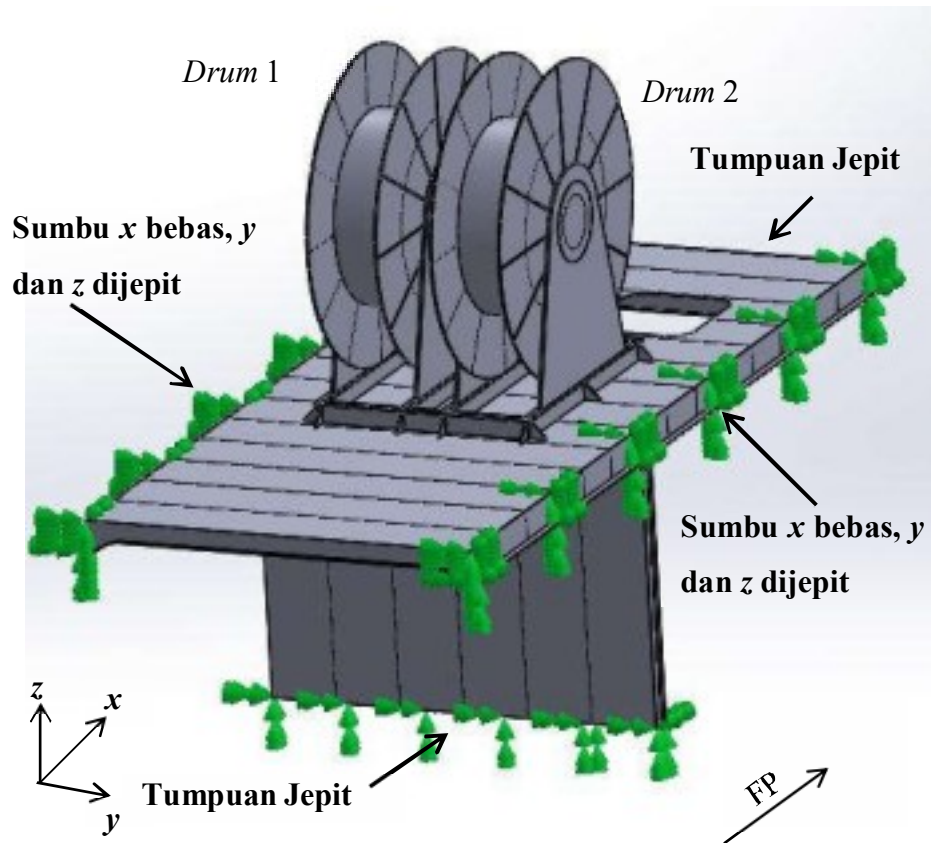


**Gambar 4.51.** Penampang di mana Tegangan Lentur Bekerja

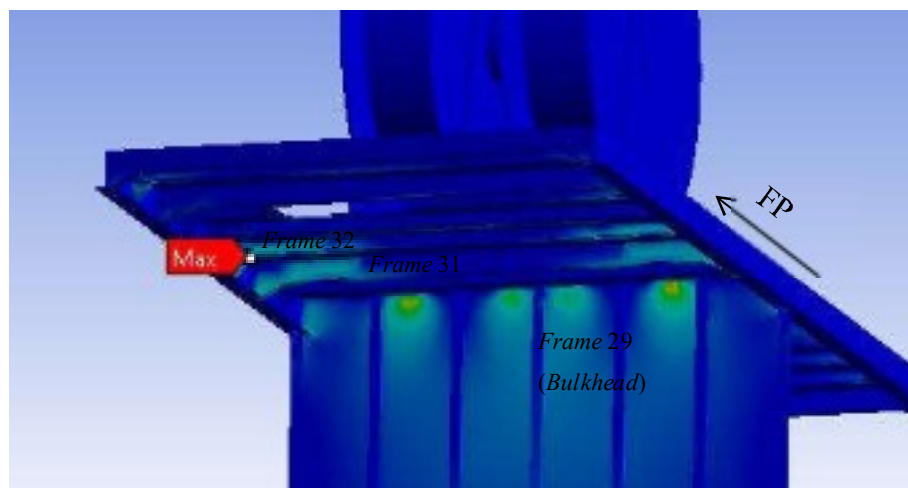
Analisis dilakukan kembali dengan model yang sama, beban gaya tarik yang sama, ukuran *mesh* maksimum 120 mm, namun dengan tambahan tegangan tarik sebesar 0.465 MPa pada penampang plat *main deck*, *side girder*, dan *center girder*, namun tumpuannya diubah. Tumpuan yang awalnya jepit untuk semua sumbu pada sisi *side girder* dan *center girder* diubah menjadi jepit pada sumbu *y* dan *z*, sementara sumbu *x* dibebaskan. Hal ini dilakukan sehingga tegangan lentur karena *bending moment* tidak langsung diterima oleh tumpuan di sisi *side girder* dan *center girder*. Tumpuan ini dapat dilihat pada gambar di halaman berikutnya.

Tegangan von Mises maksimum yang terjadi pada model adalah sebesar **27.64 MPa**, tidak jauh berbeda dari analisis sebelumnya yang sebesar 26.99 MPa. Lokasinya pun tidak berubah, seperti pada analisis sebelumnya, yaitu pada *frame 32* yang menjadi tumpuan *bracket* pondasi *airgun umbilicals winch roller*. Hal ini menarik, dari sini dapat diketahui bahwa pengaruh tegangan lentur akibat *longitudinal bending moment* pada kapal dalam analisis

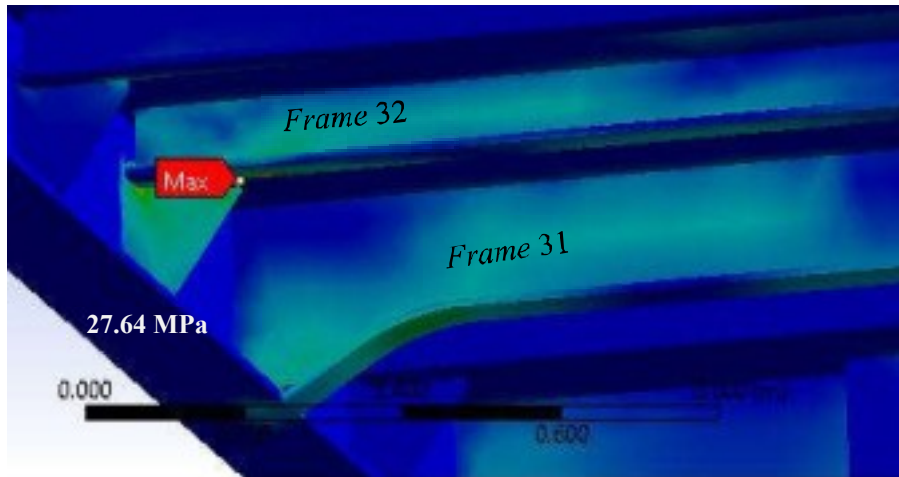
lokal kekuatan struktur tidak terlalu besar, karena struktur yang dimodelkan sudah cukup (tidak terlalu sempit).



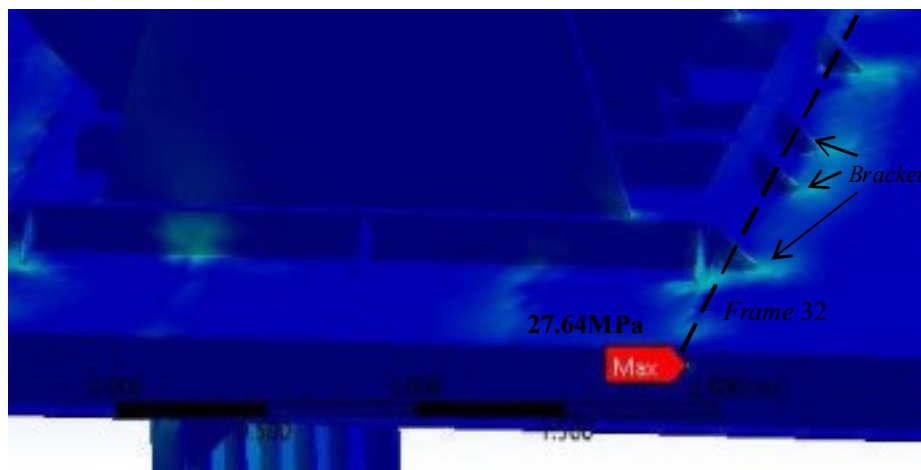
Gambar 4.52. Penentuan Tumpuan untuk Analisis Baru



Gambar 4.53. Tegangan von Mises Maksimum dengan *Bending Moment* (a)



**Gambar 4.54.** Tegangan von Mises Maksimum dengan *Bending Moment* (b)



**Gambar 4.55.** Frame 32 yang Menumpu Bracket Pondasi

Perhatikan gambar di atas dan gambar yang ada di halaman sebelumnya. Meski dengan memberikan tambahan syarat batas berupa tegangan akibat *longitudinal bending moment*, lokasi dan distribusi tegangan von Mises yang terjadi tidak berubah secara signifikan (lihat kembali gambar 4.43 hingga 4.46 pada sub bab 4.7). Konsentrasi tegangan von Mises juga terjadi pada plat *bulkhead* yang menumpu kedudukan pondasi *airgun umbilicals winch roller* (lihat gambar 4.55) seperti pada analisis yang tidak mengikutsertakan tegangan akibat *longitudinal bending moment*.

Dari hasil analisis yang dilakukan, baik dengan ataupun tanpa menerapkan tegangan lentur akibat *longitudinal bending moment*, dapat diketahui bahwa tegangan von Mises yang terjadi pada keseluruhan model adalah **27.64 MPa**,

yang jauh sekali dari *yield stress* baja A36, atau 27.64 MPa  $\ll$  250 MPa. Hal ini memberikan angka faktor keamanan sebesar **9.05** (faktor keamanan adalah perbandingan antara *yield stress* dan tegangan yang terjadi). Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa konstruksi pondasi *winch roller* untuk *airgun umbilicals* beserta *frame-frame* pendukungnya pada kapal survei seismik Geomarin IV yang beroperasi pada wilayah perairan Laut Arafuru adalah sangat kuat dan aman.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BAB V

### PENUTUP

#### 5.1. Kesimpulan

Dari keseluruhan pengerjaan Tugas Akhir, dapat disimpulkan beberapa hal untuk menjawab rumusan masalah yang telah ditentukan. Hal-hal tersebut antara lain sebagai berikut.

##### 5.1.1. Gerakan Kapal Geomarin IV saat Operasi Survei Seismik

Amplitude signifikan gerakan kapal survei seismik Geomarin IV saat survei seismik dilakukan (*streamer* dan *airgun umbilical* terbentang dan ditarik dengan kecepatan 5 knot) pada perairan dengan spektrum gelombang JONSWAP ( $H_s = 4.2$  m dan  $T_p = 9.5$  s) terbesar adalah pada gerakan *pitch* sebesar 1.427 derajat untuk *following sea* (*heading*  $0^0$ ). Amplitude signifikan terbesar gerakan *surge* terjadi saat *head sea* (*heading*  $180^0$ ) sebesar 0.333 m. Sementara amplitude signifikan terbesar gerakan *heave* terjadi saat *following sea* sebesar 0.507 m.

##### 5.1.2. Gaya Tarik *Airgun Umbilical* saat Operasi Survei Seismik

Gaya tarik maksimum pada *airgun umbilical* terjadi pada arah datang beban lingkungan  $180^0$  (*head sea*) yang nilainya sebesar 23.70 kN pada setiap *line airgun umbilical* (*line* no. 1 ada pada sisi terluar arah *port* berurutan hingga *line* no. 4 pada sisi terluar arah *starboard*). Nilai yang sama ini disebabkan karena posisinya yang simetris. Sementara nilainya yang tidak terlalu besar disebabkan karena dampak dari *diverter/barovane* sudah tidak terlalu signifikan.

##### 5.1.3. Kekuatan Konstruksi Pondasi *Airgun Umbilicals Winch Roller*

Analisis dilakukan dengan menerapkan beban berupa gaya tarik *airgun umbilical* yang sudah dikalikan faktor 1.1 berdasarkan DNV *Part 3 Hull, Chapter 11 Hull Equipment, Supporting Structure, and Appendages*, pada *Section 3* terkait “*winches others than those used for mooring and ship towing*”, sehingga beban yang diaplikasikan sebesar 26.07 kN pada setiap *drum*. Untuk pertimbangan lanjutan, tegangan sebesar 0.465 MPa akibat

*longitudinal bending moment* diterapkan pada penampang melintang *plat main deck, center girder, dan side girder*.

Dari analisis yang dilakukan dapat diketahui bahwa tegangan von Mises maksimum yang terjadi sebesar 27.64 MPa. Tegangan ini berada jauh di bawah *yield stress* baja A36, atau 27.64 MPa  $\ll$  250 MPa, sehingga memberikan angka faktor keamanan sebesar 9.05. Tegangan von Mises tersebut terjadi pada *frame 32* yang memang menjadi tumpuan *bracket* pondasi *airgun umbilicals winch roller*, beban tarik dari *umbilical* diteruskan oleh *bracket* ke *frame 32* tersebut. Oleh karena itu konstruksi pondasi *airgun umbilicals winch roller* beserta *frame-frame* pendukungnya pada kapal survei seismik Geomarin IV saat beroperasi di perairan Laut Arafuru dapat dikatakan sangat kuat dan aman.

## 5.2.Saran

Untuk penelitian selanjutnya terkait dengan topik atau masalah yang sama, penulis memberikan saran-saran sebagai berikut.

- 1.Mengikutsertakan analisis gaya tarik *airgun umbilical* untuk arah datang beban lingkungan  $45^0$  (*quartering sea*) atau  $90^0$  (*beam sea*).
- 2.Disarankan untuk menggunakan *software* lain seperti AQWA atau Hyperworks.



## DAFTAR PUSTAKA

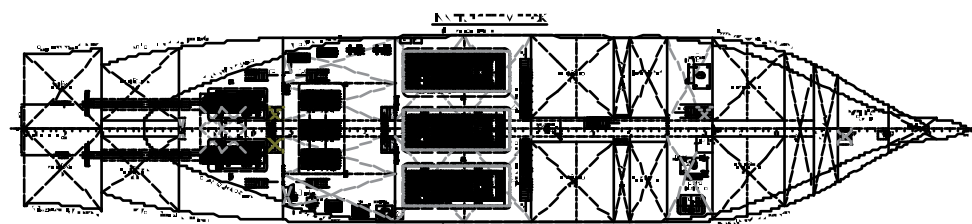
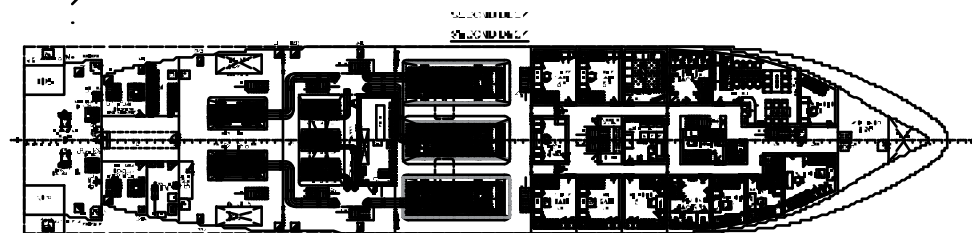
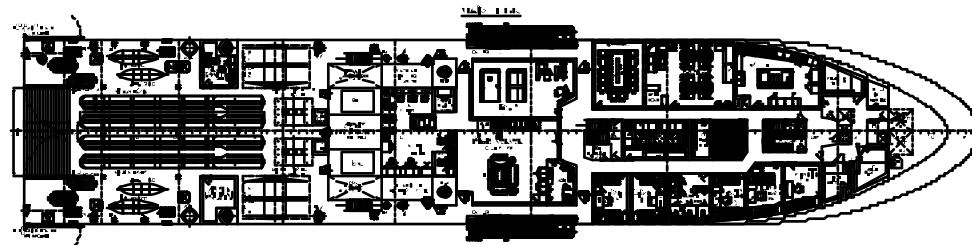
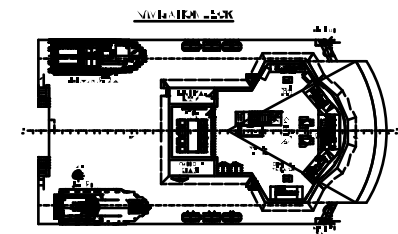
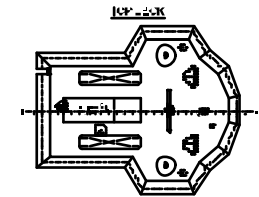
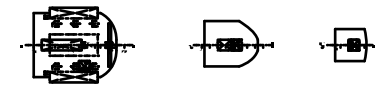
- Ahmad, I. (2016). *Analisa Kekuatan Struktur Haluan Kapal Survei Seismik Geomarin IV Terhadap Beban Slamming dan Greenwater*. Surabaya: Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan, ITS.
- Barltrop, N. D., & Adams, A. J. (1991). *Dynamics of Fixed Marine Structures* (3rd ed.). Oxford, United Kingdom: Marine Technology Directorate.
- Berteaux, H. O. (1976). *Buoy Engineering*. New York: Wiley & Sons.
- Bhattacharyya, R. (1978). *Dynamics of Marine Vehicle*. New York, United States: John Wiley & Sons Inc.
- Chakrabarti, S. K. (1987). *Hydrodynamics of Offshore Structures*. Berlin, Germany: Computational Mechanics Publications.
- Djarmiko, E. B. (2012). *Perilaku dan Operabilitas Bangunan Laut di Atas Gelombang Acak*. Surabaya, Indonesia: ITS Press.
- Faltinsen, O. M. (1990). *Sea Loads on Ships and Offshore Structures*. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press.
- Irawati, Murtedjo, M., & Hadiwidodo, Y. S. (2013). Analisis Tegangan Lokal Konstruksi Windlass pada Bow FSO Akibat Pengaruh Modifikasi Sistem Offloading. *Jurnal Teknik POMITS*, 2(1), 1-6.
- Journee, J. M., & Massie, W. W. (2001). *Offshore Hydromechanics* (1st ed.). Delft: Delft University.
- Lewis, E. V. (1988). *Principle of Naval Architecture: Motions in Waves and Controllability* (3rd ed., Vol. III). Jersey City, New Jersey, United States: Society of Naval Architects and Marine Engineers.
- Logan, D. L. (2011). *A First Course in the Finite Element Method* (5th ed.). Stamford, Connecticut, United States: Cengage Learning Engineering.
- Milburn, D. A., & Fagot, M. G. (1980). *A Steady-State Analysis of Candidate Towing Cables for A Deep-Towed Geophysical Array System*. Naval Ocean Research and Development Activity, Ocean Technology Division. Mississippi: Naval Ocean Research and Development Activity.
- Newman, J. N. (1977). *Marine Hydrodynamics*. Massachusetts, United States: MIT Press.

- Popov, E. P. (1990). *Engineering Mechanics of Solid*. Englewood Cliffs, New Jersey, United States: Prentice-Hall Inc.
- Popov, E. P. (1996). *Mekanika Teknik*. (Z. A. T., Trans.) Jakarta, Indonesia: Erlangga.
- Sabana, N. M. (2011). *Analisis Tegangan pada Yoke Arm External Turret Mooring System Floating Production Storage and Offloading (FPSO)*. Surabaya: Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan, ITS.
- Salvesen, N., Tuck, E. O., & Faltinsen, O. M. (1970). Ship Motions and Sea Loads. (pp. 250-278). New York: Society of Naval Architects and Marine Engineers.
- Srivastava, V. K., Sanyasiraju, Y., & Tamsir, M. (2011, July). Behaviour of Underwater Towed-Cable in Linear Profile. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 2(7), 1-6.
- Torsethaugen, K., Faanes, T., & Haver, S. (1985). *Characteristics for Extreme Sea States on the Norwegian Continental Shelf*. Trondheim: Norwegian Hydrodynamic Laboratories.
- Urgural, C. A. (2010). *Stresses in Beams, Plates, and Shells* (3rd ed.). Boca Raton, United States: CRC Press.
- Wardana, A. W. (2016). *Analisis Kekuatan Struktur Pondasi Winch Roller Streamer pada Kapal Survei Seismik*. Surabaya: Jurusan Teknik Kelautan, ITS.
- Wilson, B. W. (1961). *Characteristics of Anchor Cables in Uniform Ocean Currents*. Texas A&M University, Department of Oceanography and Meteorology. College Station: Texas A&M University.



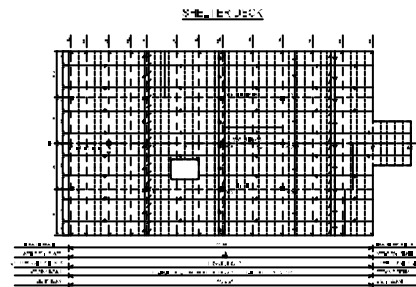
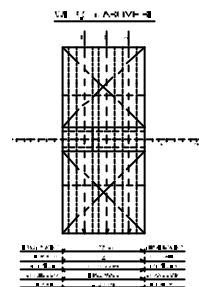
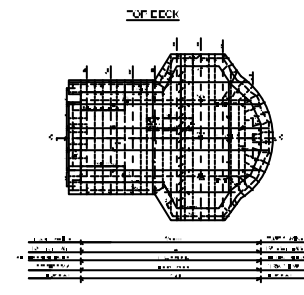
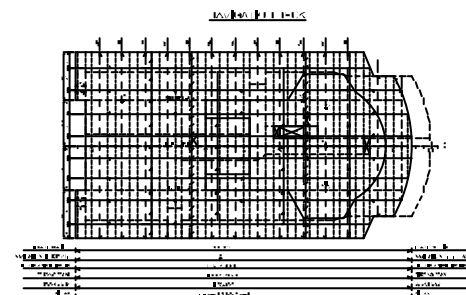
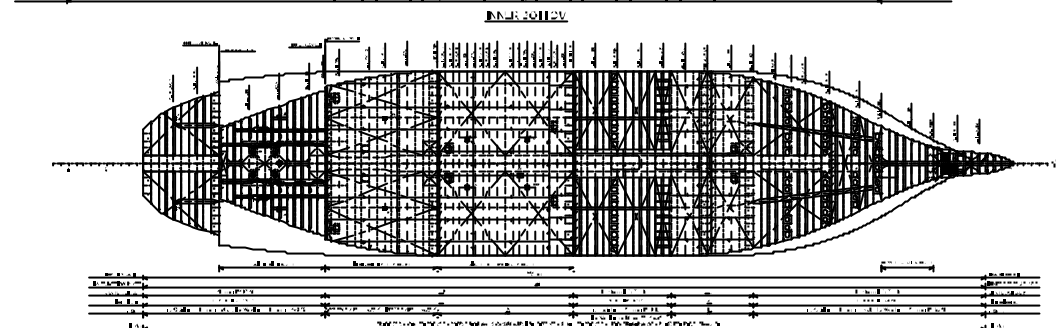
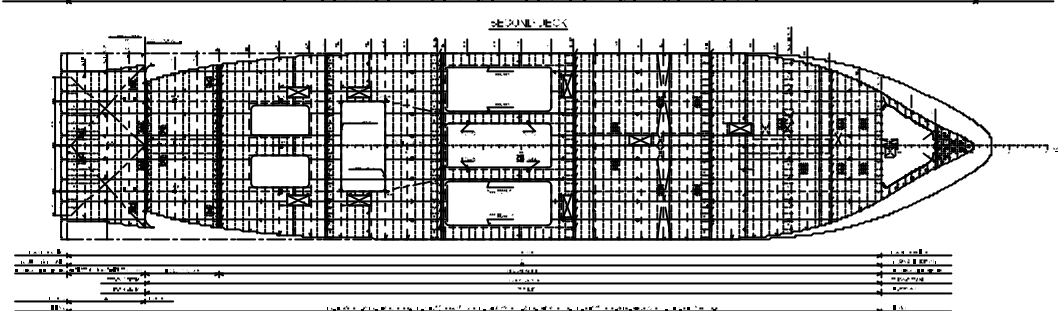
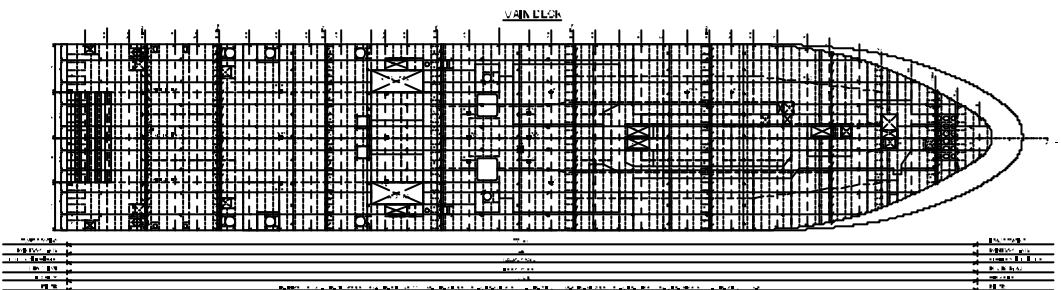
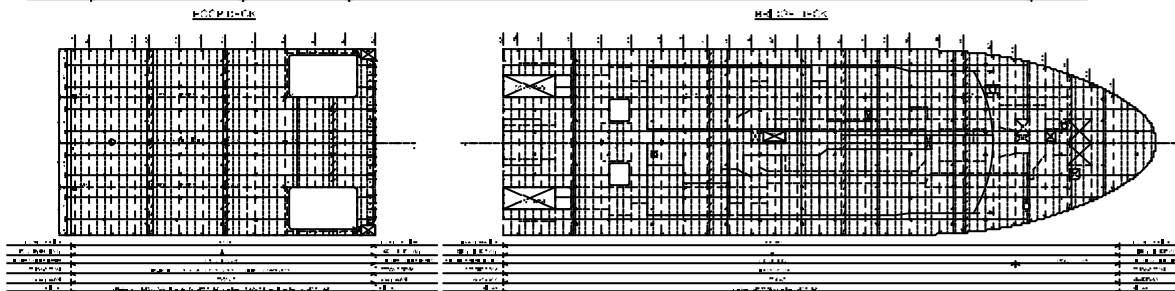
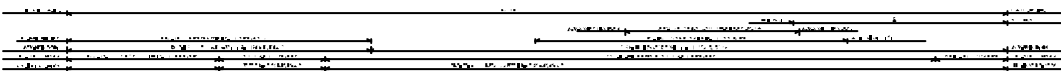
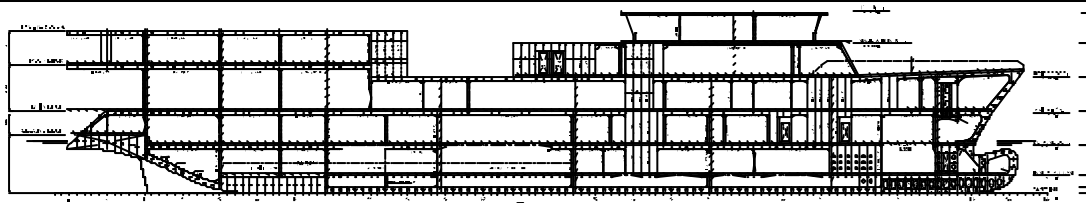
## LAMPIRAN A

- *General Arrangement*
- *Key Plan*
- *Hydrostatics*
- *Weight Calculation*



- $\mathbb{R}^n$  ist ein  $\mathbb{R}$ -Vektorraum mit  $\dim \mathbb{R}^n = n$ .  
 $\mathbb{R}^n$  ist ein  $\mathbb{C}$ -Vektorraum mit  $\dim \mathbb{R}^n = 2n$ .
- $\mathbb{C}^n$  ist ein  $\mathbb{C}$ -Vektorraum mit  $\dim \mathbb{C}^n = n$ .  
 $\mathbb{C}^n$  ist ein  $\mathbb{R}$ -Vektorraum mit  $\dim \mathbb{C}^n = 2n$ .
- $\mathbb{H}^n$  ist ein  $\mathbb{H}$ -Vektorraum mit  $\dim \mathbb{H}^n = n$ .  
 $\mathbb{H}^n$  ist ein  $\mathbb{R}$ -Vektorraum mit  $\dim \mathbb{H}^n = 4n$ .

[illegible]



# MAIN DIMENSIONS

Overall Length	100.00 m
Waterline Length	95.00 m
Beam	12.00 m
Draft	4.50 m
Displacement	1000.00 t

GENERAL INFORMATION		DESIGN INFORMATION	
Project Name	Ship Design Project	Design Office	ABC Design Office
Client	XYZ Shipyard	Project Manager	John Doe
Design Date	2023-10-27	Revision	1.0
Scale	1:100	Author	John Doe
Sheet No.	1 of 1	Checker	John Doe

# HYDROSTATIC OF GEOMARIN IV

Parameter	Simbol	Satuan	Draft (m)					
			0 - 0.5	0.5 - 1.0	1.0 - 1.5	1.5 - 2.0	2.0 - 2.5	2.5 - 3.0
<i>Displacement</i>	( $\Delta$ )	ton	183.80	512.40	873.30	1257.00	1660.00	2079.00
<i>Volume Displaced</i>	( $\nabla$ )	m <sup>3</sup>	179.32	499.90	852.00	1226.34	1619.51	2028.29
<i>Length of Waterline</i>	LWL	m	61.220	64.514	66.403	68.011	69.658	71.451
<i>Wetted Surface Area</i>	WSA	m <sup>2</sup>	598.66	710.40	802.01	890.50	978.21	1067.20
<i>Water Plane Area</i>	WPA	m <sup>2</sup>	593.72	677.50	728.43	769.13	802.42	832.27
Koefisien Prismatic	C <sub>P</sub>		0.620	0.648	0.664	0.676	0.682	0.685
Koefisien Blok	C <sub>B</sub>		0.405	0.527	0.579	0.610	0.628	0.639
Koefisien Midship	C <sub>M</sub>		0.671	0.814	0.873	0.903	0.922	0.934
Koefisien Bidang Garis Air	C <sub>WPA</sub>		0.674	0.715	0.744	0.765	0.779	0.787
<i>Longitudinal Center of Buoyancy</i>	LCB <sub>AP</sub>	m	37.781	37.663	37.257	36.842	36.423	35.993
<i>Longitudinal Center of Floatation</i>	LCF <sub>AP</sub>	m	38.164	37.106	36.292	35.509	34.703	33.872
<i>Center of Buoyancy above Keel</i>	KB	m	0.326	0.601	0.871	1.140	1.410	1.680
<i>Transversal Metacentric Radius</i>	BM <sub>T</sub>	m	40.857	18.58	12.3	9.319	7.564	6.403
<i>Longitudinal Metacentric Radius</i>	BM <sub>L</sub>	m	611.548	290.641	202.063	160.339	134.503	117.347
<i>Transversal Keel to Metacenter</i>	KM <sub>T</sub>	m	41.184	19.182	13.171	10.459	8.974	8.083
<i>Longitudinal Keel to Metacenter</i>	KM <sub>L</sub>	m	611.874	291.242	202.934	161.479	135.913	119.027
<i>Ton per 1 centimeter Immersion</i>	TPC	ton/cm	6.086	6.944	7.466	7.884	8.225	8.531
<i>Moment to Trim 1 centimeter</i>	MTC	ton-m	16.105	21.189	24.987	28.455	31.449	34.318



### HYDROSTATIC OF GEOMARIN IV

Parameter	Simbol	Satuan	Draft (m)					
			3.0 - 3.5	3.5 - 4.0	4.0 - 4.5	4.5 - 5.0	5.0 - 5.5	5.5 - 6.0
<i>Displacement</i>	( $\Delta$ )	ton	2514.00	2972.00	3450.00	3943.00	4445.00	4955.00
<i>Volume Displaced</i>	( $\nabla$ )	m <sup>3</sup>	2452.68	2899.51	3365.85	3846.83	4336.59	4834.15
<i>Length of Waterline</i>	LWL	m	76.062	72.611	72.856	73.132	73.410	73.688
<i>Wetted Surface Area</i>	WSA	m <sup>2</sup>	1162.13	1267.82	1362.83	1450.68	1535.50	1620.39
<i>Water Plane Area</i>	WPA	m <sup>2</sup>	868.28	915.24	948.86	971.78	988.13	1002.55
Koefisien Prismatic	C <sub>P</sub>		0.660	0.710	0.726	0.740	0.753	0.764
Koefisien Blok	C <sub>B</sub>		0.622	0.674	0.694	0.711	0.726	0.739
Koefisien Midship	C <sub>M</sub>		0.943	0.950	0.956	0.960	0.964	0.967
Koefisien Bidang Garis Air	C <sub>WPA</sub>		0.771	0.852	0.880	0.898	0.910	0.919
<i>Longitudinal Center of Buoyancy</i>	LCB <sub>AP</sub>	m	35.549	35.039	34.530	34.090	33.735	33.454
<i>Longitudinal Center of Floatation</i>	LCF <sub>AP</sub>	m	32.900	31.705	31.125	30.936	30.974	31.069
<i>Center of Buoyancy above Keel</i>	KB	m	1.952	2.229	2.509	2.790	3.068	3.344
<i>Transversal Metacentric Radius</i>	BM <sub>T</sub>	m	5.581	5.004	4.589	4.218	3.865	3.564
<i>Longitudinal Metacentric Radius</i>	BM <sub>L</sub>	m	108.923	107.322	101.479	94.169	87.184	81.299
<i>Transversal Keel to Metacenter</i>	KM <sub>T</sub>	m	7.533	7.233	7.099	7.008	6.933	6.908
<i>Longitudinal Keel to Metacenter</i>	KM <sub>L</sub>	m	110.875	109.551	103.988	96.958	90.252	84.643
<i>Ton per 1 centimeter Immersion</i>	TPC	ton/cm	8.900	9.381	9.726	9.961	10.128	10.276
<i>Moment to Trim 1 centimeter</i>	MTC	ton-m	38.542	44.989	49.459	52.520	54.911	57.205

LAMPIRAN - Perhitungan KG Full Load

Parameter	Fluid Density	Volume	Massa	CG from AP	CG from CL (+stbd)	CG from Keel	Moment abt. AP	Moment abt. CL	Moment abt. Keel
	(ton/m <sup>3</sup> )	(m <sup>3</sup> )	(ton)	(m)	(m)	(m)	(ton-m)	(ton-m)	(ton-m)
<i>Lightship</i>			1789.614	31.427	0.024	6.362	56242.199	42.951	11385.524
FPT	1.025	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
WBT No. 1	1.025	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
FWT No. 1	1.000	77.692	77.692	59.311	0.000	2.134	4607.990	0.000	165.795
FWT No. 2 (P)	1.000	116.900	116.900	54.960	-3.388	2.107	6424.824	-396.057	246.308
FWT No. 2 (S)	1.000	116.900	116.900	54.960	3.388	2.107	6424.824	396.057	246.308
FWT No. 4 DB (P)	1.000	22.674	22.674	47.049	-3.645	0.811	1066.789	-82.647	18.389
FWT No. 3 (P)	1.000	24.790	24.790	50.288	-3.470	0.819	1246.640	-86.021	20.303
FWT No. 3 (S)	1.000	24.790	24.790	50.288	3.470	0.819	1246.640	86.021	20.303
FWT No. 4 DB (S)	1.000	22.674	22.674	47.049	3.645	0.811	1066.789	82.647	18.389
FWT No. 4 (P)	1.000	48.391	48.391	47.059	-3.986	2.608	2277.232	-192.887	126.204
FWT No. 4 (S)	1.000	48.391	48.391	47.059	3.986	2.608	2277.232	192.887	126.204
FOT No. 1 (P)	0.870	123.287	107.260	41.064	-3.897	1.619	4404.512	-417.991	173.653
FOT No. 1 (S)	0.870	123.287	107.260	41.064	3.897	1.619	4404.512	417.991	173.653
FOT No. 2 (P)	0.870	42.718	37.165	35.049	-3.794	0.807	1302.584	-141.003	29.992
FOT No. 2 (S)	0.870	42.718	37.165	35.049	3.794	0.807	1302.584	141.003	29.992
FOT No. 3 (S)	0.870	43.323	37.691	29.668	3.755	0.794	1118.217	141.530	29.927
FOT No. 3 (P)	0.870	43.323	37.691	29.668	-3.755	0.794	1118.217	-141.530	29.927
FOT No. 4 (P)	0.870	55.487	48.274	23.072	-3.318	0.829	1113.771	-160.172	40.019
FOT No. 4 (S)	0.870	55.487	48.274	23.072	3.318	0.829	1113.771	160.172	40.019
FOT No. 5 (P)	0.870	51.844	45.104	7.129	-2.745	2.819	321.548	-123.811	127.149
FOT No. 5 (S)	0.870	51.844	45.104	7.129	2.745	2.819	321.548	123.811	127.149
WBT No. 2 (P)	1.025	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
WBT No. 2 (S)	1.025	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
FOT DT (P)	0.870	6.048	5.262	14.365	-6.100	4.400	75.585	-32.097	23.152
FOT DT (S)	0.870	6.048	5.262	14.365	6.100	4.400	75.585	32.097	23.152
TOTAL		1148.616	2854.326				99553.593	42.951	13221.509

Keterangan:

- FPT = *Fore Peak Ballast Tank*
- WBT = *Water Ballast Tank*
- FWT = *Fresh Water Tank*
- FOT = *Fuel Oil Tank*
- (P)/(S) = *Port dan Starboard*
- DT = *Day Tank*

Full Load Condition		
(LCG)	CG from AP (m)	34.878
(TCG)	CG from CL (m)	0.015
(VCG/KG)	CG from Keel (m)	4.632





## LAMPIRAN B

- *Output* RAO

0 0KNOT

```
*****
*                                     *** MOSES ***                               *
*                                     -----                               *
*                                     14 April, 2017                               *
*                                     RESPONSE AMPLITUDE OPERATOR OF GEOMARIN IV      *
*                                     OCEAN ENGINEERING DEPARTMENT                    *
* Draft = 4.2 Meters                  Trim Angle = 0.00 Deg.                      GMT = 2.56 Meters *
* Roll Gy. Radius = 6.0 Meters        Pitch Gy. Radius = 20.9 Meters             Yaw Gy. Radius = 20.9 Meters *
* Heading = 0.00 Deg.                 Forward Speed = 0.00 Knots                 Linearization Based on 1/ 20 *
*                                                                              *
*****
```

+++ M O T I O N R E S P O N S E O P E R A T O R S +++  
=====

Of Point On Body HULL At X = 38.3 Y = 0.0 Z = 4.6

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified

E N C O U N T E R		Surge /		Sway /		Heave /		Roll /		Pitch /		Yaw /	
-----		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.	
Frequency	Period	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/
-(Rad/Sec)-	-(Sec)-	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase
0.0500	125.66	0.974	91	0.000	0	0.999	1	0.000	0	0.015	-105	0.000	0
0.1000	62.83	0.972	92	0.000	0	0.999	2	0.000	0	0.058	-91	0.000	0
0.2000	31.42	0.963	99	0.000	0	0.997	9	0.000	0	0.234	-80	0.000	0
0.3000	20.94	0.944	110	0.000	0	0.988	20	0.000	0	0.529	-68	0.000	0
0.4000	15.71	0.907	126	0.000	0	0.963	35	0.000	0	0.941	-51	0.000	0
0.5000	12.57	0.843	147	0.000	0	0.906	54	0.000	0	1.448	-30	0.000	0
0.6000	10.47	0.745	172	0.000	0	0.802	76	0.000	0	1.991	-4	0.000	0
0.7000	8.98	0.611	-158	0.000	0	0.638	101	0.001	64	2.456	24	0.000	0
0.8000	7.85	0.446	-124	0.000	0	0.414	123	0.002	-138	2.660	56	0.000	0
0.9000	6.98	0.266	-86	0.000	0	0.176	121	0.002	-134	2.367	90	0.000	0
1.0000	6.28	0.101	-47	0.000	0	0.209	62	0.002	-111	1.405	128	0.000	0
1.1000	5.71	0.026	-144	0.000	0	0.290	69	0.001	-85	0.235	-114	0.000	0
1.2000	5.24	0.084	-112	0.000	0	0.149	91	0.000	0	0.862	0	0.000	0
1.3001	4.83	0.080	-59	0.000	0	0.026	-28	0.000	0	0.706	59	0.000	0
1.4000	4.49	0.038	-2	0.000	0	0.076	16	0.000	0	0.246	156	0.000	0
1.4999	4.19	0.008	-59	0.000	0	0.041	94	0.000	0	0.224	-33	0.000	0
1.6000	3.93	0.023	-23	0.000	0	0.016	-71	0.001	126	0.219	77	0.000	0
1.7000	3.70	0.015	58	0.000	0	0.031	52	0.004	-140	0.112	-140	0.000	0
1.7998	3.49	0.003	-136	0.000	0	0.042	-137	0.002	101	0.216	47	0.000	0
1.9000	3.31	0.007	11	0.000	0	0.012	67	0.000	0	0.066	-131	0.000	0
1.9997	3.14	0.003	129	0.000	0	0.011	-136	0.001	-87	0.080	40	0.000	0

0 0KNOT

```
*****
*                                     *** MOSES ***                               *
*                                     -----                               *
*                                     14 April, 2017                               *
*                                     RESPONSE AMPLITUDE OPERATOR OF GEOMARIN IV      *
*                                     OCEAN ENGINEERING DEPARTMENT                    *
* Draft = 4.2 Meters                  Trim Angle = 0.00 Deg.                      GMT = 2.56 Meters      *
* Roll Gy. Radius = 6.0 Meters        Pitch Gy. Radius = 20.9 Meters             Yaw Gy. Radius = 20.9 Meters *
* Heading = 45.00 Deg.                Forward Speed = 0.00 Knots                Linearization Based on 1/ 20 *
*                                                                              *
*****
```

+++ M O T I O N R E S P O N S E O P E R A T O R S +++  
=====

Of Point On Body HULL At X = 38.3 Y = 0.0 Z = 4.6

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified

E N C O U N T E R		Surge /		Sway /		Heave /		Roll /		Pitch /		Yaw /	
-----		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.	
Frequency	Period	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/
-(Rad/Sec)-	-(Sec)-	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase
0.0500	125.66	0.689	90	0.704	90	0.999	0	0.010	90	0.011	-112	0.005	174
0.1000	62.83	0.687	92	0.702	92	0.999	2	0.041	92	0.041	-93	0.021	179
0.2000	31.42	0.682	96	0.696	96	0.998	6	0.170	98	0.165	-84	0.085	-174
0.3000	20.94	0.671	104	0.683	104	0.994	14	0.405	107	0.375	-74	0.188	-167
0.4000	15.71	0.653	116	0.662	115	0.982	25	0.787	121	0.673	-62	0.326	-156
0.5000	12.57	0.623	130	0.630	129	0.955	39	1.420	139	1.055	-47	0.489	-144
0.6000	10.47	0.579	148	0.589	147	0.905	55	2.670	160	1.511	-29	0.663	-129
0.7000	8.98	0.518	169	0.553	164	0.821	73	6.358	161	2.007	-9	0.785	-115
0.8000	7.85	0.440	-166	0.377	180	0.695	92	6.996	97	2.475	13	0.739	-81
0.9000	6.98	0.347	-139	0.280	-145	0.508	109	2.496	98	2.786	36	0.859	-56
1.0000	6.28	0.246	-109	0.191	-116	0.265	113	1.074	157	2.708	60	0.790	-30
1.1000	5.71	0.145	-76	0.103	-84	0.133	42	0.729	-116	1.974	85	0.615	-1
1.2000	5.24	0.057	-44	0.035	-50	0.227	17	0.820	-41	0.892	128	0.381	31
1.3001	4.83	0.014	-138	0.004	-138	0.185	40	0.857	17	0.445	-129	0.153	66
1.4000	4.49	0.048	-124	0.013	-119	0.095	93	0.715	72	0.500	-41	0.006	-16
1.4999	4.19	0.054	-80	0.010	-31	0.043	-169	0.436	126	0.421	31	0.061	-21
1.6000	3.93	0.038	-33	0.014	66	0.038	-58	0.127	178	0.274	119	0.037	31
1.7000	3.70	0.014	10	0.013	129	0.036	38	0.098	75	0.191	-132	0.019	-135
1.7998	3.49	0.006	-66	0.005	159	0.030	-133	0.164	137	0.140	17	0.047	-66
1.9000	3.31	0.013	-25	0.007	107	0.006	-95	0.097	-156	0.055	106	0.034	-15
1.9997	3.14	0.010	40	0.010	153	0.005	35	0.011	127	0.070	-109	0.012	-45



0 0KNOT

```
*****
*                                     *** MOSES ***                             *
*                                     -----                             *
*                                     14 April, 2017                             *
*                                     RESPONSE AMPLITUDE OPERATOR OF GEOMARIN IV      *
*                                     OCEAN ENGINEERING DEPARTMENT                    *
* Draft = 4.2 Meters                 Trim Angle = 0.00 Deg.             GMT = 2.56 Meters *
* Roll Gy. Radius = 6.0 Meters       Pitch Gy. Radius = 20.9 Meters   Yaw Gy. Radius = 20.9 Meters *
* Heading = 180.00 Deg.              Forward Speed = 0.00 Knots      Linearization Based on 1/ 20 *
*                                     *                                           *
*****
```

+++ M O T I O N   R E S P O N S E   O P E R A T O R S +++  
=====

Of Point On Body HULL At X = 38.3 Y = 0.0 Z = 4.6

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified

E N C O U N T E R		Surge /		Sway /		Heave /		Roll /		Pitch /		Yaw /	
-----		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.	
Frequency	Period	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/
-(Rad/Sec)-	-(Sec)-	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase
0.0500	125.66	0.974	-90	0.000	0	0.999	0	0.000	0	0.015	106	0.000	0
0.1000	62.83	0.972	-91	0.000	0	0.999	-1	0.000	0	0.058	92	0.000	0
0.2000	31.42	0.963	-98	0.000	0	0.997	-8	0.000	0	0.234	81	0.000	0
0.3000	20.94	0.944	-109	0.000	0	0.989	-19	0.000	0	0.528	68	0.000	0
0.4000	15.71	0.907	-125	0.000	0	0.964	-35	0.000	0	0.936	50	0.000	0
0.5000	12.57	0.843	-146	0.000	0	0.910	-56	0.000	0	1.440	27	0.000	0
0.6000	10.47	0.745	-171	0.000	0	0.813	-81	0.000	0	1.988	-1	0.000	0
0.7000	8.98	0.611	159	0.000	0	0.665	-109	0.001	-159	2.481	-36	0.000	0
0.8000	7.85	0.446	125	0.000	0	0.469	-140	0.002	-36	2.752	-78	0.000	0
0.9000	6.98	0.267	88	0.000	0	0.253	-164	0.001	-117	2.586	-128	0.000	0
1.0000	6.28	0.102	50	0.000	0	0.155	-140	0.001	177	1.812	172	0.000	0
1.1000	5.71	0.026	144	0.000	0	0.313	-155	0.001	110	0.601	105	0.000	0
1.2000	5.24	0.084	115	0.000	0	0.362	139	0.001	39	0.397	-139	0.000	0
1.3001	4.83	0.081	62	0.000	0	0.193	64	0.000	0	0.765	146	0.000	0
1.4000	4.49	0.039	5	0.000	0	0.009	38	0.000	0	0.547	68	0.000	0
1.4999	4.19	0.007	60	0.000	0	0.072	82	0.000	0	0.117	-35	0.000	0
1.6000	3.93	0.023	26	0.000	0	0.052	5	0.001	-162	0.187	106	0.000	0
1.7000	3.70	0.015	-55	0.000	0	0.002	-18	0.005	125	0.175	9	0.000	0
1.7998	3.49	0.004	139	0.000	0	0.020	-26	0.002	-141	0.065	-114	0.000	0
1.9000	3.31	0.007	-11	0.000	0	0.012	-102	0.000	0	0.080	0	0.000	0
1.9997	3.14	0.004	-130	0.000	0	0.008	41	0.000	0	0.091	-110	0.000	0

5 KNOT

```
*****
*                                     *** MOSES ***                             *
*                                     -----                             *
*                                     14 April, 2017                             *
*                                     RESPONSE AMPLITUDE OPERATOR OF GEOMARIN IV      *
*                                     OCEAN ENGINEERING DEPARTMENT                    *
* Draft = 4.2 Meters                  Trim Angle = 0.00 Deg.                      GMT = 2.56 Meters      *
* Roll Gy. Radius = 6.0 Meters        Pitch Gy. Radius = 20.9 Meters             Yaw Gy. Radius = 20.9 Meters *
* Heading = 0.00 Deg.                 Forward Speed = 5.00 Knots                Linearization Based on 1/ 20 *
*                                                                              *
*****
```

# +++ M O T I O N   R E S P O N S E   O P E R A T O R S +++

=====

Of Point On Body HULL At X = 38.3 Y = 0.0 Z = 4.6

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified

E N C O U N T E R		Surge /		Sway /		Heave /		Roll /		Pitch /		Yaw /	
-----		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.	
Frequency	Period	/-----/		/-----/		/-----/		/-----/		/-----/		/-----/	
-(Rad/Sec)-	-(Sec)-	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase
0.0493	127.33	0.974	91	0.000	0	0.999	1	0.000	0	0.015	-106	0.000	0
0.0974	64.52	0.972	92	0.000	0	0.999	2	0.000	0	0.055	-91	0.000	0
0.1895	33.16	0.965	98	0.000	0	0.998	8	0.000	0	0.210	-81	0.000	0
0.2764	22.73	0.950	107	0.000	0	0.992	17	0.000	0	0.449	-71	0.000	0
0.3580	17.55	0.925	119	0.000	0	0.976	28	0.000	0	0.755	-58	0.000	0
0.4343	14.47	0.888	133	0.000	0	0.948	41	0.000	0	1.106	-44	0.000	0
0.5057	12.43	0.838	148	0.000	0	0.902	55	0.000	0	1.478	-28	0.000	0
0.5713	11.00	0.777	164	0.000	0	0.838	70	0.000	0	1.837	-12	0.000	0
0.6324	9.94	0.706	-178	0.000	0	0.756	84	0.000	0	2.157	4	0.000	0
0.6877	9.14	0.629	-162	0.000	0	0.662	98	0.001	68	2.409	20	0.000	0
0.7380	8.51	0.551	-145	0.000	0	0.559	110	0.002	37	2.576	35	0.000	0
0.7829	8.03	0.476	-130	0.000	0	0.456	120	0.003	-129	2.653	50	0.000	0
0.8221	7.64	0.407	-116	0.000	0	0.359	127	0.002	-141	2.646	63	0.000	0
0.8572	7.33	0.343	-103	0.000	0	0.271	129	0.002	-140	2.568	75	0.000	0
0.8859	7.09	0.292	-92	0.000	0	0.204	126	0.002	-136	2.447	85	0.000	0
0.9099	6.90	0.249	-82	0.000	0	0.160	116	0.002	-132	2.302	94	0.000	0
0.9286	6.77	0.216	-75	0.000	0	0.141	102	0.002	-128	2.162	101	0.000	0
0.9420	6.67	0.193	-70	0.000	0	0.139	91	0.002	-125	2.046	106	0.000	0
0.9505	6.61	0.179	-66	0.000	0	0.143	84	0.002	-123	1.965	109	0.000	0
0.9511	6.61	0.178	-66	0.000	0	0.143	83	0.002	-123	1.960	109	0.000	0
0.9534	6.59	0.174	-65	0.000	0	0.145	82	0.002	-122	1.937	110	0.000	0

5 KNOT

```
*****
*                                     *** MOSES ***                             *
*                                     -----                             *
*                                     14 April, 2017                             *
* RESPONSE AMPLITUDE OPERATOR OF GEOMARIN IV                             *
* OCEAN ENGINEERING DEPARTMENT                             *
* Draft = 4.2 Meters Trim Angle = 0.00 Deg. GMT = 2.56 Meters                             *
* Roll Gy. Radius = 6.0 Meters Pitch Gy. Radius = 20.9 Meters Yaw Gy. Radius = 20.9 Meters *
* Heading = 45.00 Deg. Forward Speed = 5.00 Knots Linearization Based on 1/ 20 *
*                                                                           *
*****
```

+++ M O T I O N R E S P O N S E O P E R A T O R S +++  
=====

Of Point On Body HULL At X = 38.3 Y = 0.0 Z = 4.6

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified

E N C O U N T E R		Surge /		Sway /		Heave /		Roll /		Pitch /		Yaw /	
-----		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.	
Frequency	Period	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/
-(Rad/Sec)-	-(Sec)-	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase
0.0495	126.84	0.689	90	0.704	90	0.999	0	0.010	90	0.011	-112	0.005	174
0.0981	64.02	0.687	92	0.702	92	0.999	2	0.040	92	0.040	-94	0.021	179
0.1926	32.63	0.683	96	0.696	96	0.998	6	0.158	97	0.153	-84	0.079	-175
0.2834	22.17	0.674	103	0.686	103	0.995	13	0.358	106	0.334	-76	0.168	-168
0.3703	16.97	0.659	112	0.669	111	0.987	21	0.654	117	0.575	-66	0.282	-160
0.4535	13.85	0.638	123	0.646	122	0.970	32	1.082	130	0.867	-54	0.411	-150
0.5333	11.78	0.610	136	0.617	135	0.942	44	1.731	146	1.200	-41	0.547	-139
0.6089	10.32	0.574	150	0.585	148	0.899	56	2.852	162	1.555	-27	0.679	-127
0.6816	9.22	0.531	165	0.562	162	0.840	70	5.484	171	1.915	-12	0.790	-117
0.7499	8.38	0.482	-179	0.501	168	0.765	83	9.593	132	2.250	1	0.704	-105
0.8149	7.71	0.427	-162	0.338	-174	0.671	95	6.895	79	2.535	16	0.771	-73
0.8759	7.17	0.371	-146	0.298	-152	0.559	105	3.202	86	2.735	31	0.856	-61
0.9325	6.74	0.315	-130	0.252	-136	0.434	112	1.851	113	2.818	44	0.850	-48
0.9871	6.37	0.259	-113	0.203	-120	0.298	114	1.181	147	2.751	57	0.806	-34
1.0363	6.06	0.208	-97	0.158	-104	0.179	101	0.858	-173	2.523	68	0.737	-20
1.0826	5.80	0.162	-82	0.118	-89	0.125	60	0.738	-131	2.151	80	0.651	-6
1.1249	5.59	0.121	-68	0.084	-75	0.161	26	0.737	-95	1.702	93	0.560	6
1.1635	5.40	0.087	-55	0.057	-63	0.206	16	0.777	-66	1.265	108	0.469	19
1.1994	5.24	0.057	-44	0.036	-51	0.227	17	0.819	-41	0.897	128	0.382	31
1.2302	5.11	0.034	-38	0.021	-42	0.228	21	0.848	-22	0.653	152	0.308	41
1.2586	4.99	0.016	-44	0.010	-39	0.216	27	0.862	-6	0.509	-178	0.242	51

5 KNOT

```
*****
*                                     *** MOSES ***                             *
*                                     -----                             *
*                                     14 April, 2017                             *
*                                     RESPONSE AMPLITUDE OPERATOR OF GEOMARIN IV      *
*                                     OCEAN ENGINEERING DEPARTMENT                    *
* Draft = 4.2 Meters                  Trim Angle = 0.00 Deg.                      GMT = 2.56 Meters      *
* Roll Gy. Radius = 6.0 Meters        Pitch Gy. Radius = 20.9 Meters             Yaw Gy. Radius = 20.9 Meters *
* Heading = 90.00 Deg.                Forward Speed = 5.00 Knots                 Linearization Based on 1/ 20 *
*                                                                              *
*****
```

# +++ M O T I O N   R E S P O N S E   O P E R A T O R S +++

=====

Of Point On Body HULL At X = 38.3 Y = 0.0 Z = 4.6

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified

E N C O U N T E R		Surge /		Sway /		Heave /		Roll /		Pitch /		Yaw /	
-----		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.	
Frequency	Period	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/
-(Rad/Sec)-	-(Sec)-	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase
0.0500	125.66	0.000	0	0.995	90	0.999	0	0.015	90	0.004	180	0.001	90
0.1000	62.83	0.000	0	0.993	90	0.999	0	0.058	90	0.004	179	0.001	90
0.2000	31.42	0.000	0	0.985	90	0.999	0	0.241	90	0.004	177	0.003	90
0.3000	20.94	0.000	0	0.971	90	1.000	0	0.576	90	0.004	173	0.007	90
0.4000	15.71	0.000	0	0.951	90	1.002	0	1.131	89	0.002	150	0.014	89
0.5000	12.57	0.000	0	0.927	90	1.006	0	2.091	88	0.005	12	0.027	87
0.6000	10.47	0.000	0	0.904	90	1.017	0	4.106	85	0.018	-1	0.062	81
0.7000	8.98	0.000	0	0.866	86	1.039	0	9.019	48	0.045	-9	0.168	35
0.8000	7.85	0.000	0	0.670	86	1.077	-1	10.423	-27	0.099	-19	0.252	-46
0.9000	6.98	0.000	0	0.629	95	1.136	-4	5.699	-70	0.205	-34	0.187	-91
1.0000	6.28	0.001	-55	0.592	98	1.209	-11	3.342	-76	0.393	-57	0.152	-104
1.1000	5.71	0.001	-90	0.538	101	1.214	-25	2.241	-73	0.635	-91	0.141	-111
1.2000	5.24	0.002	-129	0.481	105	1.031	-41	1.601	-68	0.748	-129	0.139	-118
1.3001	4.83	0.001	-160	0.424	111	0.750	-53	1.181	-61	0.663	-159	0.137	-124
1.4000	4.49	0.001	180	0.370	117	0.516	-57	0.886	-54	0.519	-178	0.136	-128
1.4999	4.19	0.001	170	0.319	124	0.354	-56	0.672	-46	0.397	172	0.132	-131
1.6000	3.93	0.001	165	0.273	133	0.246	-50	0.513	-36	0.307	168	0.128	-132
1.7000	3.70	0.000	0	0.231	142	0.169	-42	0.391	-26	0.249	167	0.123	-131
1.7998	3.49	0.000	0	0.195	154	0.134	-35	0.303	-16	0.192	172	0.116	-128
1.9000	3.31	0.000	0	0.163	166	0.101	-21	0.231	-5	0.159	-179	0.109	-125
1.9997	3.14	0.000	0	0.136	180	0.074	-8	0.168	5	0.130	-172	0.102	-120



5 KNOT

```
*****
*                                     *** MOSES ***                             *
*                                     -----                             *
*                                     14 April, 2017                             *
*
*      RESPONSE AMPLITUDE OPERATOR OF GEOMARIN IV                             *
*      OCEAN ENGINEERING DEPARTMENT                                           *
*
*      Draft = 4.2 Meters      Trim Angle = 0.00 Deg.      GMT = 2.56 Meters      *
*      Roll Gy. Radius = 6.0 Meters      Pitch Gy. Radius = 20.9 Meters      Yaw Gy. Radius = 20.9 Meters      *
*      Heading = 180.00 Deg.      Forward Speed = 5.00 Knots      Linearization Based on 1/ 20      *
*
*****
```

+++ M O T I O N R E S P O N S E O P E R A T O R S +++  
=====

Of Point On Body HULL At X = 38.3 Y = 0.0 Z = 4.6

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified

E N C O U N T E R		Surge /		Sway /		Heave /		Roll /		Pitch /		Yaw /	
-----		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.	
Frequency	Period	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/
-(Rad/Sec)-	-(Sec)-	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase
0.0507	124.03	0.974	-90	0.000	0	0.999	0	0.000	0	0.016	106	0.000	0
0.1026	61.22	0.972	-91	0.000	0	0.999	-1	0.000	0	0.061	92	0.000	0
0.2105	29.85	0.962	-99	0.000	0	0.997	-9	0.000	0	0.259	80	0.000	0
0.3237	19.41	0.937	-113	0.000	0	0.985	-23	0.000	0	0.614	64	0.000	0
0.4419	14.22	0.883	-133	0.000	0	0.945	-43	0.000	0	1.137	41	0.000	0
0.5654	11.11	0.783	-162	0.000	0	0.852	-72	0.000	0	1.798	9	0.000	0
0.6945	9.05	0.619	161	0.000	0	0.674	-108	0.001	-155	2.458	-34	0.000	0
0.8281	7.59	0.396	115	0.000	0	0.408	-148	0.001	-62	2.760	-91	0.000	0
0.9684	6.49	0.151	61	0.000	0	0.151	-154	0.001	-161	2.125	-167	0.000	0
1.1126	5.65	0.036	147	0.000	0	0.331	-162	0.001	101	0.448	96	0.000	0
1.2630	4.97	0.088	82	0.000	0	0.270	92	0.001	2	0.707	174	0.000	0
1.4179	4.43	0.031	-3	0.000	0	0.019	129	0.000	0	0.471	53	0.000	0
1.5761	3.99	0.022	42	0.000	0	0.062	24	0.000	0	0.150	132	0.000	0
1.7446	3.60	0.008	-105	0.000	0	0.013	-168	0.012	-103	0.148	-78	0.000	0
1.9128	3.28	0.007	-25	0.000	0	0.014	-128	0.000	0	0.095	-8	0.000	0
2.0892	3.01	0.002	80	0.000	0	0.011	-107	0.000	0	0.048	52	0.000	0
2.2690	2.77	0.000	0	0.000	0	0.009	-84	0.000	0	0.048	95	0.000	0
2.4543	2.56	0.000	0	0.000	0	0.004	-125	0.000	0	0.029	51	0.000	0
2.6502	2.37	0.000	0	0.000	0	0.002	154	0.000	0	0.018	-40	0.000	0
2.8431	2.21	0.000	0	0.000	0	0.007	178	0.001	-113	0.050	-3	0.000	0
3.0508	2.06	0.000	0	0.000	0	0.001	-121	0.000	0	0.009	41	0.000	0

## BIODATA PENULIS



Dimas Maulana Rachman dilahirkan di Surabaya pada tanggal 21 Agustus 1995. Memulai jenjang pendidikan dasar di Madrasah Ibtidaiyah Mujahidin Surabaya hingga lulus pada tahun 2006. Kemudian melanjutkan ke jenjang pendidikan menengah ke atas di SMP Negeri 1 Surabaya hingga lulus pada tahun 2010 dan di SMA Negeri 5 Surabaya hingga lulus pada tahun 2013. Penulis kemudian melanjutkan ke jenjang pendidikan tinggi di Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya. Selama menempuh perkuliahan, penulis aktif dalam berbagai kegiatan baik akademik seperti menjadi pengajar dalam persiapan Ujian Akhir Semester bidang fisika dan pelatihan *software*, maupun non akademik seperti menjadi ketua tim advokasi Himpunan Mahasiswa Teknik Kelautan dan ketua tim konseptor *National Underwater Robotic Competition* pada tahun 2015 dan 2016. Penulis memiliki latar belakang yang baik di bidang metode numerik (*programming*), mekanika fluida, hidrodinamika, dan metode elemen hingga. Penulis juga sempat melaksanakan kerja praktik di P.T. Marine CadCam Indonesia yang berlokasi di Batam sebagai anggota divisi *Finite Element Analysis* (FEA).

### Kontak Penulis

*Email* : dimas.maulanar@yahoo.com

*Phones*: +6283832402700 / +6282257528707